

Konzeption und Entwicklung der Steuerung für die wissenschaftliche PanCam-HRC Autofokus-Kamera der ESA ExoMars Mission

Diplomarbeit
von
Björn Schüler

Ausgabetermin: 15.09.2008
Abgabetermin: 15.03.2009

Konzeption und Entwicklung der Steuerung für die wissenschaftliche PanCam-HRC Autofokus-Kamera der ESA ExoMars Mission

Diplomarbeit
von
Björn Schüler

bj.schueler@web.de
Mat. Nr.: 93539

Aufgabenstellung: Dr. Harald Michaelis (DLR)
Betreuung: Dipl.-Ing. Martin Richter (TU Dortmund)
Dr. Harald Michaelis (DLR)
Dipl.-Inf. Frank Trauthan (DLR)

Absolvierungsort: Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt e.V. (DLR)
Institut für Planetenforschung
Abteilung für Planetare Sensorsysteme
Berlin Adlershof

Lehrstuhl: Technische Universität Dortmund
Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
Arbeitsgebiet Schaltungen der Informationsverarbeitung
Prof. Dr.-Ing. Hartmut Schröder

Kurzfassung

Für das Jahr 2016 ist eine unbemannte Marsmission der Europäischen Raumfahrtbehörde ESA geplant. Die sogenannte ExoMars Mission wird aus einem frei beweglichen autonomen Rover bestehen, der wissenschaftliche Untersuchungen auf der Marsoberfläche durchführen wird. Ein Kamerasystem, das sowohl hochauflösende Detailaufnahmen von Gesteinsproben als auch weit entfernte Objekte wie z.B. Hindernisse scharf darstellen kann, ist essentiell für den Erfolg der Mission. Um stets qualitativ hochwertige und scharfe Bilder mit der Kamera aufzunehmen, ist es notwendig einen automatischen Fokussier- und Belichtungsmechanismus in das Kamerasystem zu integrieren. Dieser Mechanismus soll die optimalen Fokussier- und Belichtungseinstellungen nur anhand der Bildauswertung treffen. In dieser Diplomarbeit werden deshalb Verfahren zur quantitativen Bestimmung der Bildqualität (Schärfe- bzw. Belichtungsbestimmung) untersucht und bewertet, mit denen anschließend verschiedene Suchstrategien die Bildqualität durch Änderung der Fokussiereinstellungen des Objektivs sowie der Veränderung der Bildbelichtungszeit optimieren. Die Suchstrategien werden an die verwendeten weltraumtauglichen Bauteile der Kamera angepasst sein und auf ihre Schnelligkeit hin untersucht.

Inhaltsverzeichnis

Einleitung.....	1
1 ESA ExoMars Mission	3
1.1 Missionsziele	4
1.2 Raumfahrzeug	4
1.3 Humboldt und Pasteur Nutzlast	6
1.4 Missionsverlauf	8
2 Grundlagen.....	11
2.1 Panorama Kamera (PanCam)	11
2.1.1 High Resolution Kamera (HRC)	13
2.1.2 Wide Angle Kamera (WAC).....	18
2.2 Optik.....	19
2.2.1 Kameraoptik.....	20
2.2.2 Schärfentiefe	21
2.2.3 Hyperfokale Distanz	23
2.2.4 Fokussierung.....	25
3 Qualitätsbestimmung digitaler Bilder	27
3.1 Verfahren zur Schärfestimmung digitaler Bilder	27
3.1.1 Spektrale Entropie.....	29
3.1.2 Sum Modulus Difference (SMD).....	31
3.1.3 Energie des Bildgradienten	32
3.1.4 Grauwertvarianz.....	32
3.1.5 Tenengrad.....	33
3.1.6 Laplace.....	35
3.2 Vergleich und Bewertung der Methoden zur Schärfestimmung mit Matlab .	36
3.2.1 Ergebnisse der Matlab Simulation.....	40
3.2.2 Einfluss der Fokussierfenstergröße.....	43
3.2.3 Einfluss von Rauschen.....	46
3.2.4 Einfluss der Bildbelichtung	49
3.2.5 Zusammenfassung und Auswertung der Untersuchungen mit Matlab	52
3.3 Vergleich und Bewertung der Methoden zur Schärfestimmung mit realen	
Messungen anhand der HRC-Kamera	52
3.3.1 Versuchsaufbau	53
3.3.2 Testdurchführung	53
3.3.3 Einfluss von Rauschen auf die Schärfekurven	55
3.3.4 Einfluss der Bildbelichtung auf die Schärfekurven	58
3.3.5 Einfluss der Fokussierfenstergröße auf die Schärfekurven	65

3.3.6	Zusammenfassung und Auswertung der Messungen mit der HRC-Kamera	68
3.4	Bestimmung der Bildintegrationszeit	69
4	Suchstrategien.....	73
4.1	Entwicklung einer Strategie zur Bestimmung der Schritteigenschaften des Piezo Fokussiermotors.....	74
4.2	Globale Suchstrategie	78
4.3	Globale Suchstrategie Nahbereich	80
4.4	Globale Suchstrategie Fernbereich	81
4.5	Angepasste Suchstrategie.....	82
4.6	Schärfentiefe basierende Suchstrategie	83
4.7	Vergleich und Bewertung der Suchstrategien.....	85
5	Die Kamerasteuerung in Visual C++	87
5.1	Gesamtsystem der Autofokus- und Integrationsmethoden.....	87
5.2	Benutzeroberfläche	88
6	Zusammenfassung und Ausblick.....	92
	Literaturverzeichnis.....	94
A	Anhang.....	96

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: ExoMars Raumsonde [4]	5
Abbildung 2: Humboldt Payload und Rover [4]	5
Abbildung 3: ExoMars Rover mit Borer [4].....	7
Abbildung 4: ExoMars Missions Ablauf mit aktuellem PanCam-HRC Fortschritt.....	10
Abbildung 5: ExoMars Rover mit Detailansicht der Panorama Kamera [7].....	11
Abbildung 6: Pan&Tilt Mechanismus [8]	12
Abbildung 7: PanCam Blockdiagramm [10]	13
Abbildung 8: RIM Testbild (links), Rovermodell mit RIM (mitte), Detailansicht RIM (rechts) [7]	14
Abbildung 9: High Resolution Camera (HRC).....	14
Abbildung 10: High Resolution Kamera (HRC) ohne Verkleidung	15
Abbildung 11: Star1000 Sensor mit aufgeklebten Farbfilter (Größenangaben in Pixel) [7]	15
Abbildung 12: Farbskala auf dem Rover zur Farbkalibrierung [7].....	16
Abbildung 13: Spannungs- und Stromverläufe des Piezo Motor im Betrieb	18
Abbildung 14: Wide Angle Camera Aufbau [7]	19
Abbildung 15: Kameraoptik vgl.[14]	20
Abbildung 16: Schärfentiefe vgl.[14]	22
Abbildung 17: Schärfentiefebereich eines Testbildes	23
Abbildung 18: Strahlengang hyperfokale Distanz vgl.[14].....	24
Abbildung 19: Beispielbild der Hyperfokaldistanz	25
Abbildung 20: unterschiedlich scharf aufgenommene Linien mit betrachteten Zeilen	28
Abbildung 21: Zeilenprofil der Pixelwerte von den drei Linien-Bildern unterschiedlicher Schärfe	28
Abbildung 22: Aufteilung Fokussierfenster (rot) in 8x8 Teilbilder	29
Abbildung 23: DCT Spektrum (rechts) eines scharfen Ausgangsbildes (links) [22] ..	30
Abbildung 24: DCT Spektrum (rechts) eines unscharfen Ausgangsbildes (links) [22]	30
Abbildung 25: Tenengrad gefiltertes Bild (rechts) eines scharfen Ausgangsbildes (links)[22]	34
Abbildung 26: Tenengrad gefiltertes Bild (rechts) eines unscharfen Ausgangsbildes (links) [22]	34
Abbildung 27: Mit Sobel Operator in x-Richtung (links) und y-Richtung (rechts) gefiltertes scharfes Ausgangsbild	35
Abbildung 28: Mit Sobel Operator in x-Richtung (links) und y-Richtung (rechts) gefiltertes unscharfes Ausgangsbild	35
Abbildung 29: Laplace gefiltertes Bild (rechts) eines scharfen Ausgangsbildes (links) [22].....	36
Abbildung 30: Laplace gefiltertes Bild (rechts) eines unscharfen Ausgangsbildes (links) [22]	36

Abbildung 31: Blockdiagramm des Matlab-Testablaufes	37
Abbildung 32: Referenzbild AMASE Rover [26].....	38
Abbildung 33: Referenzbild Mars „TwinPeaks“ [27]	38
Abbildung 34: Referenzbild Vulkanstein	39
Abbildung 35: unterschiedlich scharf gezeichnete Bildversionen des Referenzbildes $\sigma=0$	40
Abbildung 36: Schärfekurven der Testbildreihe des Referenzbildes Rover	41
Abbildung 37: Schärfekurven der Testbildreihe des Referenzbild Mars	42
Abbildung 38: Schärfekurven der Testbildreihe des Referenzbildes Stein	42
Abbildung 39: Schärfekurven der Rover Testbildreihe mit Fokussierfenstergröße 400x400 Pixel	44
Abbildung 40: Schärfekurven der Rover Testbildreihe mit Fokussierfenstergröße 100x100 Pixel	44
Abbildung 41: Schärfekurven der Rover Testbildreihe mit Fokussierfenstergröße 50x50 Pixel	45
Abbildung 42: Schärfekurven der Rover Testbildreihe mit Fokussierfenstergröße 10x10 Pixel	45
Abbildung 43: Schärfekurven der Rover Testbildreihe mit Fokussierfenstergröße 5x5 Pixel.....	46
Abbildung 44: verrauschte Testbilder des Rovers , Rauschintensität $r=0.1$ (links) und $r=0.3$ (rechts)	47
Abbildung 45: verrauschte Testbilder des Rover, Rauschintensität $r=0.5$ (links) und $r=0.7$ (rechts)	47
Abbildung 46: Schärfekurven der Rover Testbildreihe mit Rauschen der Intensität: $r=0.01$	47
Abbildung 47: Schärfekurven der Rover Testbildreihe mit Rauschen der Intensität: $r=0.03$	48
Abbildung 48: Schärfekurven der Rover Testbildreihe mit Rauschen der Intensität: $r=0.05$	48
Abbildung 49: Schärfekurven der Rover Testbildreihe mit Rauschen der Intensität: $r=0.07$	49
Abbildung 50: unterbelichtetes Bild des Rovers (Faktor $b=0.1$)	50
Abbildung 51: überbelichtetes Bild des Rovers (Faktor $b= 1.8$)	50
Abbildung 52: Schärfekurven der Rover Testbildreihe mit Belichtung $b=0.1$	51
Abbildung 53: Schärfekurven der Rover Testbildreihe mit Belichtung $b=1.8$	51
Abbildung 54: Testaufbau.....	53
Abbildung 55: Testbild HRC-Versuche	54
Abbildung 56: Blockdiagramm des Testablaufes	54
Abbildung 57: Schärfekurven eines Objektes in 6m Entfernung	55
Abbildung 58: Schärfekurven eines Objektes in 6m Entfernung mit Rauschintensität $b=0.03$	56

Abbildung 59: Schärfekurven eines Objektes in 6m Entfernung mit Rauschintensität $b=0.06$	57
Abbildung 60: Schärfekurven eines Objektes in 6m Entfernung mit Rauschintensität $b=0.09$	57
Abbildung 61: Testbild Beleuchtungsstärke 50Lux mit Fokussierfenster	58
Abbildung 62: Schärfekurven eines Objektes in 5m Entfernung (50 Lux)	59
Abbildung 63: Testbild Beleuchtungsstärke 600 Lux mit Fokussierfenster	59
Abbildung 64: Schärfekurven eines Objektes in 5m Entfernung (600 Lux)	60
Abbildung 65: Testbild Beleuchtungsstärke 6000 Lux mit Fokussierfenster	60
Abbildung 66: Schärfekurven eines Objektes in 5m Entfernung (6000 Lux)	61
Abbildung 67: BayesDCT Schärfekurven bei verschiedenen Belichtungsintensitäten	62
Abbildung 68: SMD Schärfekurven bei verschiedenen Belichtungsintensitäten	62
Abbildung 69: EdB Schärfekurven bei verschiedenen Belichtungsintensitäten	63
Abbildung 70: VdG Schärfekurven bei verschiedenen Belichtungsintensitäten	63
Abbildung 71: Tenengrad Schärfekurven bei verschiedenen Belichtungsintensitäten	64
Abbildung 72: Laplace Schärfekurven bei verschiedenen Belichtungsintensitäten ..	64
Abbildung 73: Verschiedene Fenstergrößen für Tests	66
Abbildung 74: Schärfekurven Fenstergröße 10x10Pixel	66
Abbildung 75: Schärfekurven Fenstergröße 50x50Pixel	67
Abbildung 76: Schärfekurven Fenstergröße 100x100Pixel	67
Abbildung 77: Schärfekurven Fenstergröße 200x200Pixel	68
Abbildung 78: Integrationsferlauf Star1000 Sensor	69
Abbildung 79: Blockdiagramm Belichtungseinstellung	70
Abbildung 80: unterbelichtetes Bild (links) mit Histogramm (rechts)	71
Abbildung 81: gut belichtetes Bild (links) mit Histogramm (rechts)	71
Abbildung 82: überbelichtetes Bild (links) mit Histogramm (rechts)	72
Abbildung 83: von links nach rechts: Referenzbild, Bild 200 Motorschritte vom Referenzbild entfernt, Bild 300 Schritte entfernt, Bild 400 Schritte entfernt	74
Abbildung 84: Kamera im geöffneten Temperaturschrank mit Testtarget	75
Abbildung 85: unterschiedlich scharfe Testtargets mit Fokussierfenster	75
Abbildung 86: Temperaturtest Piezzo-Motor Richtung 1	76
Abbildung 87: Temperaturtest Piezzo-Motor Richtung 2	77
Abbildung 88: Vergleich der Integrationskurven beider Motorrichtungen	78
Abbildung 89: globale Suche Suchstrategie	79
Abbildung 90: Schärfekurven von unterschiedlich entfernten Objekten	80
Abbildung 91: Suchstrategie für die globale Suche Nahbereich	81
Abbildung 92: Suchstrategie für die globale Suche Fernbereich	82
Abbildung 93: Funktionsweise angepasste Suchstrategie	83

Abbildung 94: hintereinandergelegte Schärfentiefebereiche (schwarz) mit Linsenpositionen (rot) vgl. [14].....	84
Abbildung 95: Blockdiagramm Gesamtsystem	88
Abbildung 96: Benutzeroberfläche HRC-Kamera	89
Abbildung 97: Live-Bild mit Fokussierfenster	91
Abbildung 98: Marsreferenzbild Matlab Rauschen $r=0.01$ (links), $r=0.03$ (rechts)	96
Abbildung 99: Marsreferenzbild Matlab Rauschen $r=0.05$ (links), $r=0.07$ (rechts)	96
Abbildung 100: Marsreferenzbild Matlab Belichtung $b=0.1$ (links), $r=1.08$ (rechts)...	96
Abbildung 101: Marsreferenzbild Matlab Fenstergröße 5x5Pixel (links), 10x10Pixel (rechts)	97
Abbildung 102: Marsreferenzbild Matlab Fenstergröße 50x50Pixel (links), 100x100Pixel (rechts)	97
Abbildung 103: Marsreferenzbild Matlab Rauschen 200x200Pixel	97
Abbildung 104: Steinreferenzbild Matlab Rauschen $r=0.01$ (links), $r=0.03$ (rechts) ..	98
Abbildung 105: Steinreferenzbild Matlab Rauschen $r=0.05$ (links), $r=0.07$ (rechts) ..	98
Abbildung 106: Steinreferenzbild Matlab Belichtung $b=0.1$ (links), $r=1.08$ (rechts)....	98
Abbildung 107: Steinreferenzbild Matlab Fenstergröße 5x5Pixel (links), 10x10Pixel (rechts)	99
Abbildung 108: Steinreferenzbild Matlab Fenstergröße 50x50Pixel (links), 100x100Pixel (rechts)	99
Abbildung 109: Steinreferenzbild Matlab Fenstergröße 200x200Pixel	99

Einleitung

Die High Resolution Kamera (HRC) ist ein hochauflösender Kamerakanal des Panorama Kamera Instruments (PanCam) der geplanten ESA ExoMars Mission. Sie befindet sich auf einem Rover, der sich autonom auf der Marsoberfläche bewegt soll. Die Bilder dieser Kamera werden für die Routenplanung des Rovers, für die optische Kontrolle aller Systeme und Manöver, sowie für wissenschaftliche Untersuchungen der Marsoberfläche benutzt. Bedingt durch die Anforderung, sowohl nahe als auch weit entfernte Objekte hochauflösend und scharf aufzunehmen, ist es erforderlich eine große Brennweite des Objektivs und einen automatischen Fokussiermechanismus einzusetzen. Aufgrund der widrigen Bedingungen bei dem Raketenstart, während der Flugphase zum Mars, als auch auf der Marsoberfläche ist es notwendig, dass gesamte Kamerasystem an diese extremen Bedingungen anzupassen und nur Bauteile zu verwenden, die diese Anforderungen gerecht werden. Die widrigen Gegebenheiten zeichnen sich insbesondere durch große Temperaturschwankungen auf der Marsoberfläche zwischen Marstag und Marsnacht, sehr geringe Temperaturen auf dem Flug zum Mars, hohe Beschleunigungskräfte bei der Landung auf dem Mars und die ungünstigen Weltraumeigenschaften wie Vakuum, stark erhöhte Strahlungsbelastung und die bei einem Raketenstart auftretenden Vibrationen und Geräusche aus.

Bestehende kommerzielle Autofokuskameras können aus diesen Gründen nicht verwendet werden. Die HRC-Kamera ist eine der ersten fokussierbaren Kamerasysteme, die außerhalb der Erdatmosphäre zum Einsatz kommen wird.

Diese Diplomarbeit befasst sich primär mit der Konzeption und Entwicklung eines Algorithmus zur Steuerung des Fokussiermechanismus und der Integrationszeit für die HRC-Kamera. Sowohl der Fokussiermechanismus als auch der Belichtungsmechanismus sollen über einen Algorithmus auf der Basis der Bildauswertung gesteuert werden. Grundlage hierfür ist die Bestimmung der Bildschärfe und Bildhelligkeit digitaler Bilder, um mit diesen Werten eine optimale Fokussierung und Belichtungssteuerung durchführen zu können. Optimierungskriterien sind die erreichbare Fokussiergenauigkeit, Fokussiergeschwindigkeit sowie eine optimale Belichtungszeit.

Die Diplomarbeit gliedert sich in insgesamt sechs Kapitel. Das erste Kapitel gibt einen Überblick über die Zielsetzung der ExoMars Mission, den Missionsablauf und die verwendeten Instrumente. Dies dient dazu, die Aufgabenbereiche, der in dieser Diplomarbeit verwendeten HRC-Kamera, für die Mission darzustellen. Das zweite Kapitel vermittelt die Grundlagen und das Hintergrundwissen zum besseren Verständnis der Arbeit. Es wird ausführlich auf die HRC-Kamera und die weiteren

Bestandteile des PanCam-Kamerasystem eingegangen. Des Weiteren werden die Grundlagen der Optik und des Fokussierens erläutert. Das dritte Kapitel beschreibt die Qualitätsbestimmung von digitalen Bildern. Es werden verschiedene Methoden beschrieben, die die Schärfe von Bildern berechnen. Diese Methoden werden mit Matlab-Testroutinen auf ihre Funktionalität überprüft und ebenfalls in die reale HRC-Software implementiert und mit einem Modell der Kamera getestet. Anschließend findet eine Bewertung und Gegenüberstellung der einzelnen Methoden statt. Ferner wird ein Verfahren erläutert, das eine optimale Belichtungszeit der Kamera bestimmt. Das vierte Kapitel beschreibt verschiedene Suchstrategien der Kamerasteuerung, um ein möglichst scharfes Bild zu erhalten. Die verschiedenen Verfahren werden ebenfalls in Matlab-Simulationen und realen Messungen miteinander verglichen und bewertet. Das fünfte Kapitel beschreibt das Gesamtsystem, bestehend aus der Bildschärfebestimmung und der Suchstrategie. Hierbei wird besonders auf die Benutzeroberfläche und deren Funktionalität des in Visual C++ umgesetzten Gesamtsystems eingegangen. Das sechste Kapitel ist eine Zusammenfassung der Diplomarbeit und ein Ausblick auf die Weiterentwicklung der HRC-Kamera.

Im Anhang befinden sich weitere Schärfekurven der Matlab-Simulationen.

1 **ESA ExoMars Mission**

Die ExoMars Mission der Europäischen Weltraumagentur ESA ist die erste Mission des ESA Aurora-Explorations-Programmes [1]. Das Aurora Programm wurde im Jahre 2001 vom Europäischen Forschungsrat und der ESA gestartet. Ziel des Programms ist es neue Technologien zu entwickeln, um bemannte und unbemannte Missionen zum Mond, Mars und anderen erdnahen Objekten zu ermöglichen und dort grundlegende wissenschaftliche Forschungen durchzuführen. Im Rahmen des Aurora Programms sind folgende Missionen geplant [2]:

- ExoMars
- Entry Vehicle Demonstrator
- Mars Sample Return
- Bemannte Mondmission
- Bemannte Marsmission

Mit dem Entry Vehicle Demonstrator (EVD) soll ein Verfahren erprobt werden, welches bei der Mars Sample Return Mission eingesetzt werden soll, um Bodenproben vom Mars zurück auf die Erde zu bringen. Die Mars Sample Return Mission ist in dem Zeitraum 2018-2022 geplant. Die Fernziele des Aurora Programms sind bemannte Missionen zum Mond (2024) und Mars (2033).

Wie bereits erwähnt, ist die ExoMars Mission die erste Mission des Aurora Programms zu dem Planeten Mars. Der Mars ist ein Nachbarplanet der Erde mit einem schwankenden Abstand von 54,5 - 401,3 Millionen km. Der mittlere Abstand zur Sonne beträgt 1,52 Astronomische Einheiten AE (1 AE = 149 597 870 691m). Ein Marsjahr dauert 687 Erdentage, ein Marstag 24 Stunden, 37 min, 22,6 Sekunden. Der Durchmesser des Planeten am Äquator beträgt 6794 km, die Masse nur 0,107 Erdmassen. Mars ist ein kalter Wüstenplanet, dessen sehr dünne Atmosphäre zu 95% aus Kohlendioxid, zu 3% aus Stickstoff und zu 2% aus Argon besteht. Der Druck, der durch die Atmosphäre entsteht, beträgt - verglichen mit dem Druck an der Erdoberfläche - nur 1/100. Die rote Färbung des Planeten entsteht durch die verbreitete Eisenoxid- Schicht auf der Oberfläche [3].

In diesem Kapitel werden die Ziele der ExoMars Mission, die einzelnen Bestandteile des Raumfahrzeugs, die sich an Bord befindenden Instrumente und der aktuelle Missionsstand erläutert. Dies geschieht, um die für die Diplomarbeit wichtige HRC-Kamera besser in das Gesamtsystem der ExoMars Mission einordnen zu können.

1.1 Missionsziele

Die Zielsetzung der ExoMars Mission gliedert sich in wissenschaftliche- und technologische Ziele, die nachfolgend aufgeführt sind.

Wissenschaftliche Ziele der Mission [4]:

- 1) Suche nach Anzeichen von früherem und gegenwärtigem Leben auf dem Mars.
- 2) Bestimmung der hydrogeologischen- und geochemischen Zusammensetzung des Marsbodens und des Marsuntergrundes.
- 3) Untersuchung der Marsumwelt an der Oberfläche und Identifizierung möglicher Risiken für zukünftige bemannte Mars Missionen.
- 4) Erforschung des Marsbodens und des Marsinneren, um ein besseres Verständnis über die Entstehung des Planeten und seine Bewohnbarkeit zu erlangen.

Technologische Ziele der Mission:

- 1) Durchführung einer sicheren Landung von großen Nutzlasten auf dem Mars.
- 2) Demonstration der Mobilität auf dem Mars und Bohrungen bis in zwei Meter Tiefe.
- 3) Gewinnung von Informationen über nötige Technologien für die zukünftige Mars Sample Return Mission.

1.2 Raumfahrzeug

Die ExoMars Raumsonde besteht - wie in Abbildung 1 gezeigt - aus einem Transportmodul (Carrier Module), welches die Raumsonde aus einer Erdumlaufbahn in eine Marsumlaufbahn bringt und aus einem Abstiegsmodul (Descent Module), das entwickelt wird, um die gesamte Nutzlast abzubremesen und sicher auf der Marsoberfläche zu landen. Eine Trennung des Transportmoduls und des Abstiegsmoduls findet kurz vor Eintritt in die Mars Atmosphäre statt. Das Transportmodul verglüht nach der Trennung in der Mars Atmosphäre. Das Abstiegsmodul wird nach dem Eintritt in die Mars Atmosphäre mit Hilfe von Fallschirmen abgebremst. Zusätzliche Luftpolster an der Unterseite des Abstiegsmoduls, die kurz vor dem Aufschlag auf die Oberfläche aufgebläht werden, dämpfen die einwirkenden Kräfte.

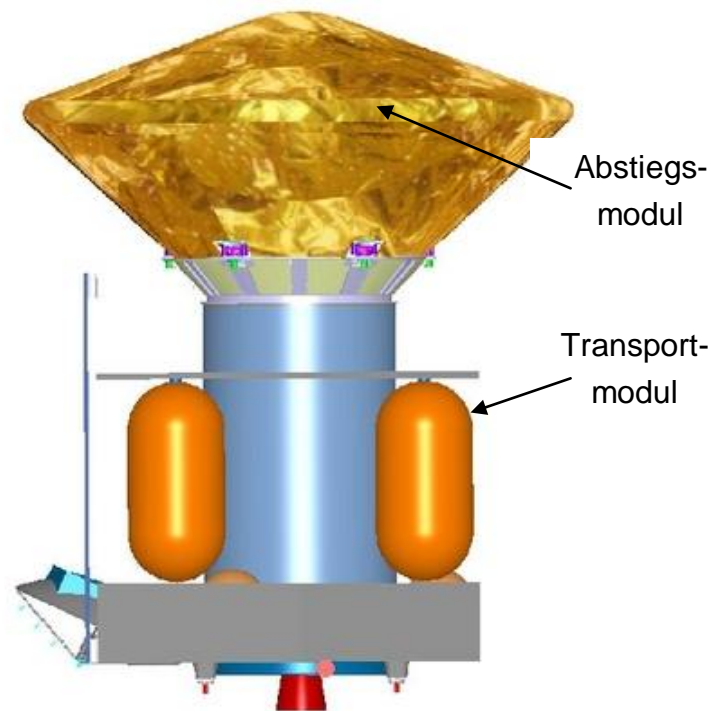


Abbildung 1: ExoMars Raumsonde [4]

Das Abstiegsmodul beinhaltet die gesamte Nutzlast, bestehend aus der Humboldt Nutzlast und einem ca. 210kg schweren mobilen Rover, auf dem die Pasteur Nutzlast angebracht ist (Abbildung 2). Mit ca. 210kg wird der Rover das schwerste und komplexeste Fahrzeug sein, das bis dahin auf der Marsoberfläche gelandet ist.

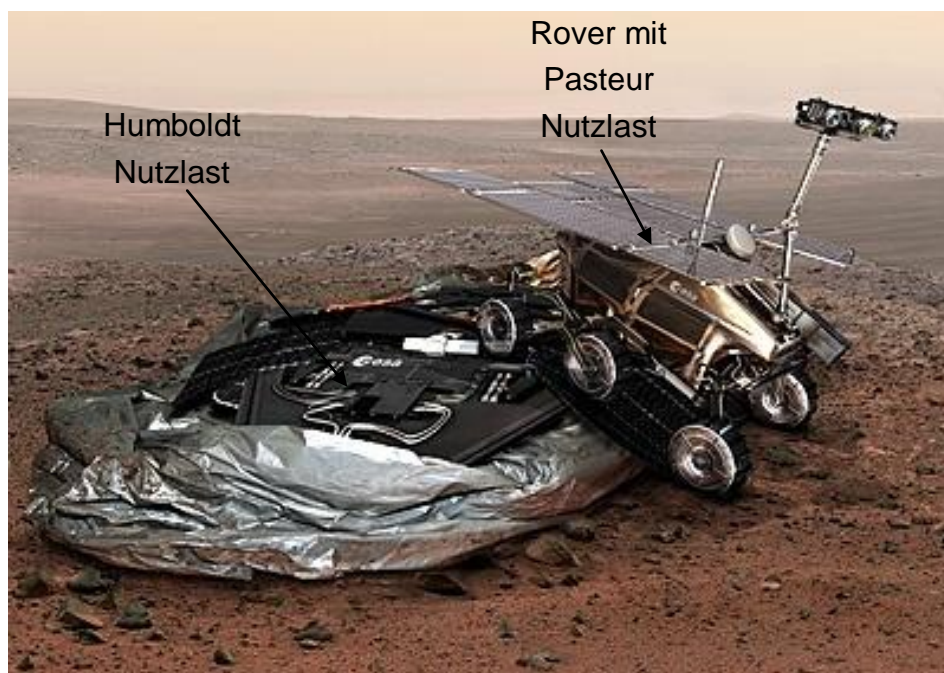


Abbildung 2: Humboldt Payload und Rover [4]

1.3 Humboldt und Pasteur Nutzlast

Die Humboldt Nutzlast führt geophysikalische Untersuchungen der Marsoberfläche durch und misst verschiedene Umwelteinflüsse in der Marsatmosphäre.

Folgende Instrumente sind Bestandteil der Humboldt Nutzlast [5]:

- Atmospheric Radiation and Electricity Sensor (ARES) zur Messung der elektrischen Felder in der Mars Atmosphäre
- AEP/ATM Instrument zur Bestimmung der Wetterverhältnisse (Temperatur, Wind, Staub, Luftfeuchtigkeit, Luftdruck)
- EISS High Frequency Radar zur Untersuchung des Marsbodens bis in mehrere Kilometer Tiefe
- HP3 (Heat Flow and Physical Properties Package) zur Erforschung der physikalischen und thermalen Eigenschaften der Geröllschicht bis in 5m Tiefe
- Ionising Radiation and Sensor Instrument (IRAS) zur Messung der Strahlungsintensität auf der Marsoberfläche
- LaRa zur Bestimmung der innerlichen Struktur des Planeten
- Martian Environmental Dust Systematic Analyser (MEDUSA) zur Analyse von Staub und kleinen Partikeln in der Atmosphäre
- MiniHUM zur Messung der Luftfeuchtigkeit und Temperatur
- Mars Surface Magnetic Observatory (MSMO) zur Messung von Magnetfeldern
- Seismometer (SEIS) zur Bestimmung der Bodenerschütterungen
- Ultraviolet and Visible Light Spectrometer (UVIS) zur Bestimmung der Intensität von sichtbarem und ultraviolettem Licht, das durch die Marsatmosphäre bis auf die Oberfläche dringt

Das Rover Modul (Abbildung 3) mit der Pasteur Nutzlast ist ein sechsräderiges autonomes Fahrzeug. Es ist in der Lage, sich frei auf der Marsoberfläche zu bewegen, bis zu zwei Meter tiefe Löcher zu bohren, Bodenproben zu entnehmen, diese selbständig zu analysieren sowie hoch auflösende Panorama- und Detailaufnahmen der Marsoberfläche zu machen. Der Schwerpunkt dieser Arbeit ist die Verbesserung dieser Aufnahmen durch den Einsatz eines automatischen Fokussier- und Belichtungsmechanismus. Diese Funktionen werden in der HRC-Kamera umgesetzt, die ein Teilsystem der Panorama Kamera (PanCam) und auf dem Mast am Rover angebracht ist (vgl. Kap 2.1).



Abbildung 3: ExoMars Rover mit Borer [4]

Neben dem Panorama Kamerasystems sind 11 weitere Instrumente im Rover vorgesehen, die vor allem exobiologische Untersuchungen durchführen und den Marsboden, bis in 2m Tiefe, geochemisch analysieren werden [5]. Die auf dem Rover eingesetzten Instrumente teilen sich in je nach Aufgabenbereich in Panorama-, Kontakt- und Analyse-Instrumente ein:

Panorama Instrumente:

- Panorama Kamerasystem (PanCam) zur Aufnahme von 3-D Panoramabildern und hochauflösenden Detailbildern der Rover Umgebung
- WISDOM zur Untersuchung des Marsuntergrundes mittels eines Radars
- MIMA zur Bestimmung der mineralogischen Zusammensetzung der Marsoberfläche und meteorologischen Zusammensetzung der Atmosphäre

Kontakt Instrumente:

- MIMOS II zur Bestimmung der Zusammensetzung von gesammelten Bodenproben mittels eines Mößbauer Spektrometer
- Close-Up Imager (CLUPI) zur detaillierten Betrachtung von Gesteinsproben

- Raman Laser Spectroscopy External Head (Raman-LIBS) Spektrometer zur Bestimmung der mineralischen Zusammensetzung der Gesteinsproben und zum Aufspüren organischer Verbindungen. Der externe Kopf ist außerhalb des Rovers an einem Arm angebracht und mit dem eigentlichen Analyse Instrument im Rover verbunden
- Imaging Spectrometer and Drill (Ma_MISS & DIBS) Spektrometer, das am Bohrkopf angebracht ist, um die Eigenschaften der Bohrwand zu bestimmen

Analyse Instrumente:

- Raman Laser Spektroskope Internal Head (Raman-LIBS) zur Bestimmung der mineralischen Zusammensetzung der Gesteinsproben und zum Aufspüren organischer Verbindungen
- MicrOmega zur Betrachtung von Gesteinsproben mittels eines Mikroskops
- Martian organic molecule analyser (MOMA) zur Detektion aller vorkommender molekularer Verbindungen
- Martian organic detector and oxidant instruments (Urey) zur Suche möglicher organischen Strukturen in Steinen
- Mars X-ray diffractometer (Mars-XDR) zum Röntgen von Gesteinsproben, um nach Spuren von Leben im Gesteinsinneren zu suchen

Die Energieversorgung des Rovers wird durch Solarmodule und Batterien sichergestellt. Heizkörper werden eingesetzt, um die Instrumente vor den kalten Marsnächten zu schützen. Da die Kommunikation mit der Erde nur an 1-2 kurzen Zeitintervallen pro Tag möglich ist, muss der Rover die gestellten Aufgaben autonom erledigen können. Die Kommunikation zwischen der Erde und dem Rover kann sowohl direkt, als auch über ESA, NASA oder Roscosmos Satelliten, die sich im Marsorbit befinden, erfolgen.

1.4 Missionsverlauf

Die Überwachung des Betriebs der gesamten Mission sowie die Steuerung des Rovers erfolgt durch das European Space Operation Center (ESOC) der ESA in Darmstadt.

Für den Transport des ExoMars Raumfahrzeugs in eine Erdumlaufbahn ist eine Ariane 5 Rakete vom ESA-Raumfahrtbahnhof Kourou in Französisch-Guayana oder ein Proton Launcher vom russischen Weltraumbahnhof Baikonur in Kasachstan vorgesehen. Der voraussichtliche Starttermin ist für das Jahr 2016 geplant. Der Flug zum Mars wird 10 Monate dauern. Die nominale Missionsdauer des Rovers und der Humboldt Payload auf der Marsoberfläche sind mindestens 180 Sols (1 Sol = 1

Marstag= 24h, 39m, 35s Erdzeit). Die Kosten für das Gesamtprojekt belaufen sich auf circa 1-1,2 Milliarden Euro und werden von 14 ESA Mitgliedstaaten getragen.

Der aktuelle Missionsstand ist in Abbildung 4 gezeigt. Diese Grafik zeigt den kompletten ExoMars Missionsablauf. Die einzelnen Phasen sind auf jede andere Weltraummission übertragbar. Die gesamte Mission lässt sich in fünf Phasen einteilen, wobei manche Phasen nochmals unterteilt werden [6].

Phase A ist eine Analysephase, ob die Mission umsetzbar ist, welche Ziele damit erreicht werden sollen, welche Instrumente dafür notwendig sind und wie viel die Mission kosten wird.

In Phase B werden die Instrumente konkret geplant und geprüft, wie eine Realisierung der Missionsziele Hardwaretechnisch möglich ist. Es werden bereits erste Prototypen der Instrumente angefertigt. Es finden ebenfalls Schnittstellendefinitionen zwischen den einzelnen Instrumenten und dem Raumorbiter statt.

In der dritten Phase findet das finale Design der Instrumente und des Raumfahrzeugs statt. Die Critical Design Review (CDR) stellt einen wichtigen Meilenstein in jeder Mission dar.

Phase D ist in zwei Teilphasen unterteilt. Während der Phase D-1 werden die Flugmodelle gebaut, die einzelnen Teilsysteme zusammengesetzt und in das Gesamtsystems des Raumorbiters eingefügt, sowie diverse Weltraumtauglichkeitstest der einzelnen Instrumente und des gesamten Raumorbiters durchgeführt. Phase D-2 beinhaltet den Start, den Flug zum Zielpunkt sowie erste Funktionstests der Instrumente.

Phase E und F bestehen schließlich aus der nominellen Mission und einer sich eventuell daran anschließenden verlängerten Missionsdauer.

Das PanCam Instrument mit der HRC Kamera befindet sich momentan in der frühen Final Design Phase (C).

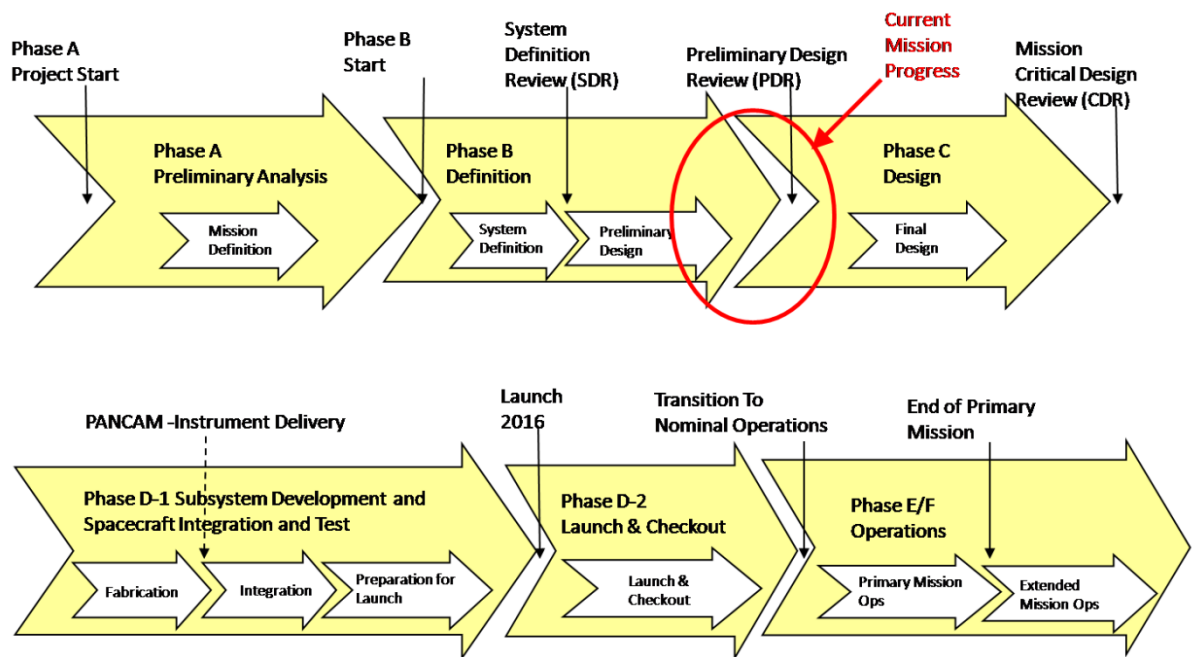


Abbildung 4: ExoMars Missions Ablauf mit aktuellem PanCam-HRC Fortschritt

2 Grundlagen

Dieses Kapitel erläutert die zum Verständnis dieser Diplomarbeit wichtigen Grundlagen. Als erstes wird das Kamerasystem beschrieben für das in dieser Diplomarbeit die Autofokus- und Autobelichtungssteuerung entwickelt wird. Das Kamerasystem besteht aus einer hoch auflösenden Kamera (High Resolution Camera, HRC) und einer Stereo-Kamera (Wide Angle Camera, WAC). Ebenfalls werden die Grundlagen der Optik beschrieben, die zum einen den Vorgang des Fokussierens verdeutlichen und zum anderen im weiteren Verlauf der Diplomarbeit benutzt werden, um eine Realisierung des Fokussiersystems zu ermöglichen.

2.1 Panorama Kamera (PanCam)

Ein wesentlicher Bestandteil des Rover Moduls der ExoMars Mission ist das Panorama Kamerasystem (PanCam). Die PanCam besteht aus zwei Modulen: der hoch auflösenden Kamera (High Resolution Camera, HRC), die vom Deutschen Zentrum für Luft und Raumfahrt in Berlin Adlershof entwickelt wird, und einer Stereo Kamera (Wide Angle Camera, WAC). Sowohl die HRC als auch die WAC werden an einen Mast auf der Oberseite des Rovers montiert (Abbildungen 5 und 6).

Ein weiteres Kamerasystem sind die NavCams, welche potentielle Hindernisse in der nahen Umgebung des Rovers erkennen und eine autonome Navigation gewährleisten soll.

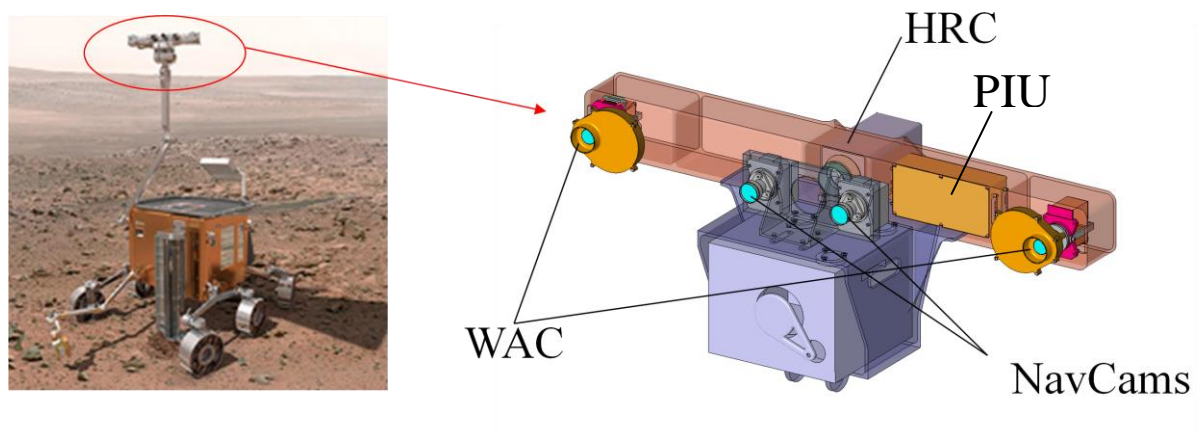


Abbildung 5: ExoMars Rover mit Detailansicht der Panorama Kamera [7]

Die Hauptaufgabe der PanCam besteht aus der visuellen Erfassung der Rover Umgebung und der Identifikation von potentiellen Zielobjekten für weitere Untersuchungen mit anderen Instrumenten.

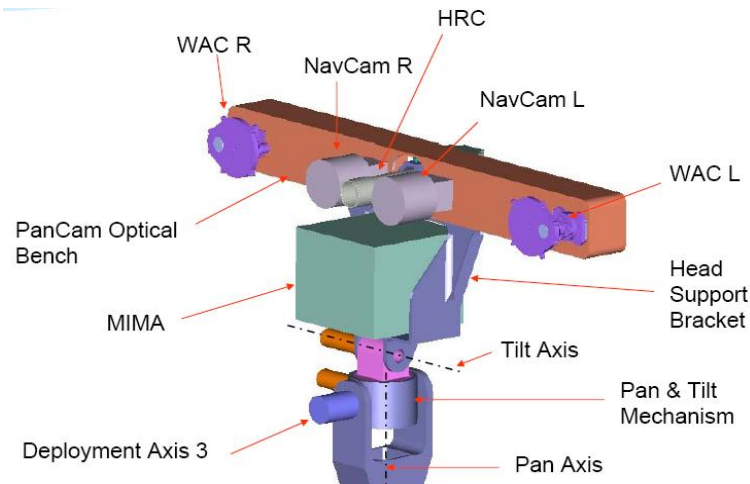
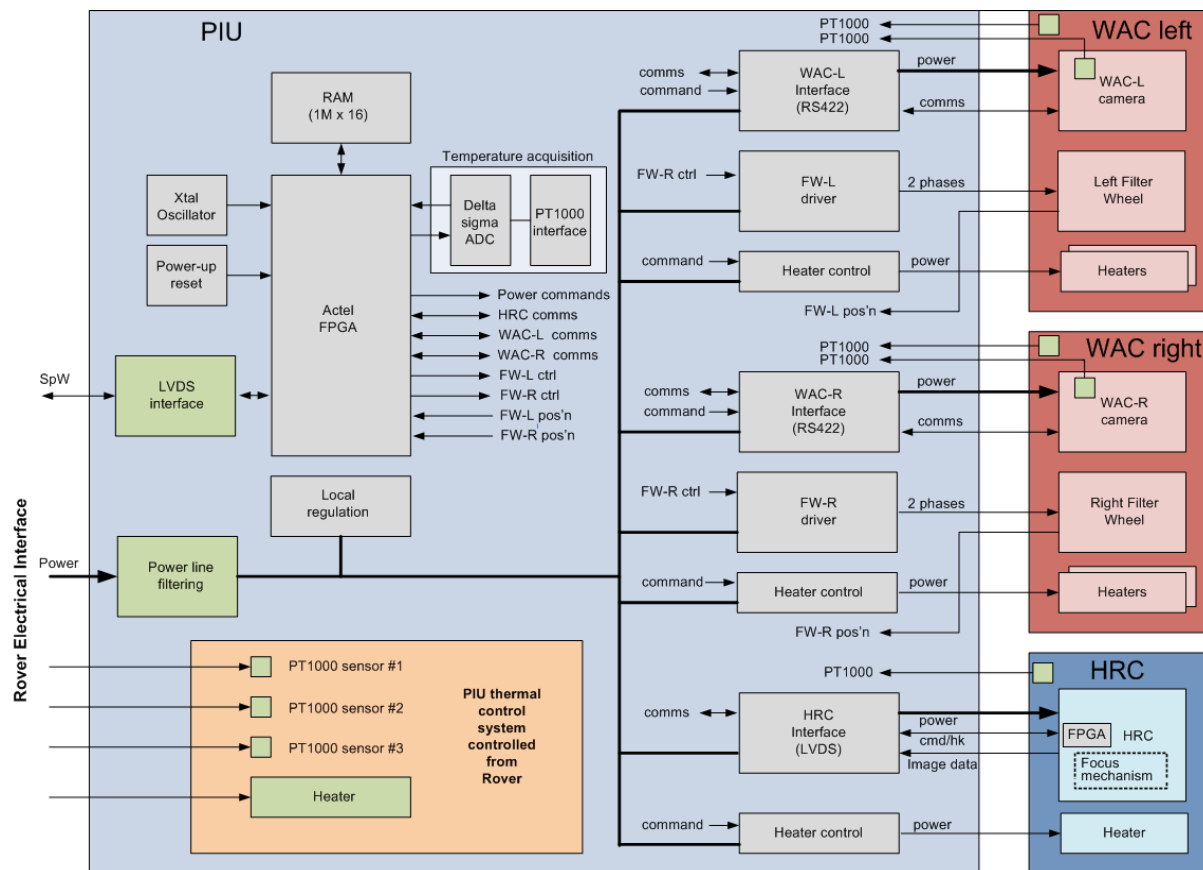


Abbildung 6: Pan&Tilt Mechanismus [8]

In Abbildung 7 ist das Blockschaltbild des PanCam-Kamerasystems zu sehen. Die einzelnen Kameramodule, welche aus der HRC-Kamera und zwei WAC-Kameras bestehen, sind über die PanCam Interface Unit (PIU) mit dem Rover verbunden. Die PIU ist an das Spannungsnetz des Rovers angeschlossen und stellt die für alle Kameras notwendigen Leistungen zur Verfügung. Eine Datenübertragung zwischen dem Rover und der PIU ist über Space Wire möglich. Space Wire ist ein Datenbus System nach dem ECSS-E50-12A Standard mit Datenraten bis zu 200 MBits/s [9]. Die Bilddaten-Leitung (image data) zwischen der HRC und der PIU ist mit 48 MHz und die Kommando Leitung (cmd/hk) mit 9,6kHz getaktet. Die in dieser Diplomarbeit entwickelte Fokussier- und Belichtungssteuerung wird im Bordcomputer des Rovers laufen. Alle notwendigen Kamerasteuerparameter und Bilder, die für die entwickelten Funktionen notwendig sind, müssen erst über die langsame Leitung zwischen Kamera und PIU und über die wesentlich schnellere Space-Wire Verbindung zwischen PIU und Rover übertragen werden. Um ein schnelles Fokussiersystem zu erhalten, muss deshalb die Anzahl der Übertragenden Bilder so gering wie möglich gehalten werden.



In den nächsten beiden Unterkapiteln werden die Aufgaben und technischen Details der für die Diplomarbeit wichtigen HRC-Kamera und in einem etwas geringeren Umfang der WAC-Kamera weiter erläutert.

2.1.1 High Resolution Kamera (HRC)

Die wissenschaftliche Zielsetzung für die Verwendung der HRC-Kamera ist es hoch auflösende Bilder in der nahen Umgebung des Rovers im Bereich zwischen 1.5-100m aufzunehmen aber auch Panorama-Aufnahmen des Horizontes durchzuführen [10]. Die hoch aufgelösten Bilder werden benutzt, um mögliche Ziele des Rovers zu bestimmen, die Umgebung zu beobachten und Steine oder ähnliche Objekte wissenschaftlich zu untersuchen. Außerdem werden mit Hilfe der Kamera die Aktivitäten des Rovers, zum Beispiel das Bohren, beobachtet und überwacht. Hierzu wird ein an einem Arm befestigter Spiegel (Rover Inspection Mirror, RIM) benutzt (Abbildung 8).

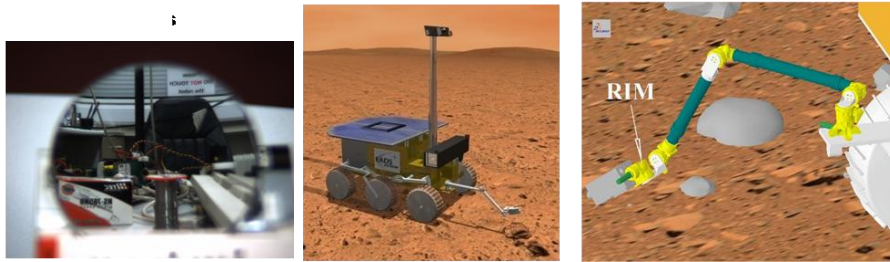


Abbildung 8: RIM Testbild (links), Rovermodell mit RIM (mitte), Detailansicht RIM (rechts) [7]

Um den geforderten Entfernungsbereich von 1.5m bis unendlich abzudecken, muss ein Fokussiermechanismus eingesetzt werden, der in dieser Arbeit entwickelt wird. In Abbildung 9 ist die für diese Diplomarbeit verwendete Version der HRC-Kamera dargestellt.



Abbildung 9: High Resolution Camera (HRC)

Abbildung 10 zeigt eine Innenansicht der Kamera. Sie besteht aus einem Sensor, einem Fokussiermotor, Ansteuerungselektronik mit einem FPGA sowie aus einem fokussierbaren Linsensystem.

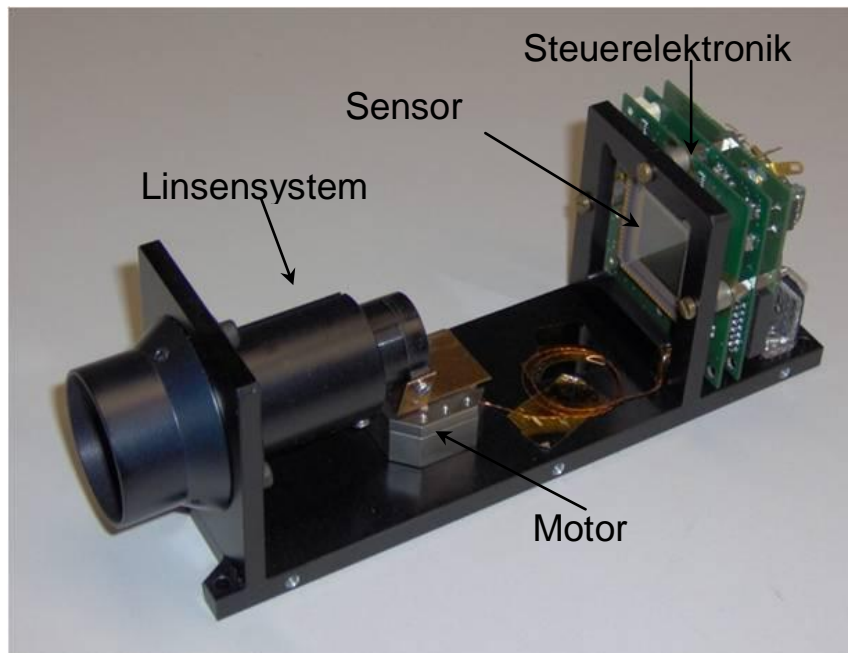


Abbildung 10: High Resolution Kamera (HRC) ohne Verkleidung

Als Basislinie wird ein Star1000 CMOS Aktiv Pixel Graustufen Sensor (APS) benutzt, der eine Auflösung von 1024×1024 Bildpunkten und einen Aussteuerungsbereich von 10 Bit pro Bildpunkt hat. Es können somit 1024 Grauwerte dargestellt werden. Die Pixelgröße beträgt $15 \mu\text{m}$. Um Farbbilder zu erhalten, wird auf dem Sensor ein Farbfiler mit einem blauen, roten und panchromatischen Teil aufgeklebt (Abbildung 11). Der panchromatische Bereich ist empfindlich für die Frequenzen $400\text{nm} - 1000\text{nm}$. Die Empfindlichkeit deckt also den gesamten, für das menschliche Auge sichtbaren Bereich des Lichtes (ca. $400\text{nm} - 780\text{nm}$), ab.

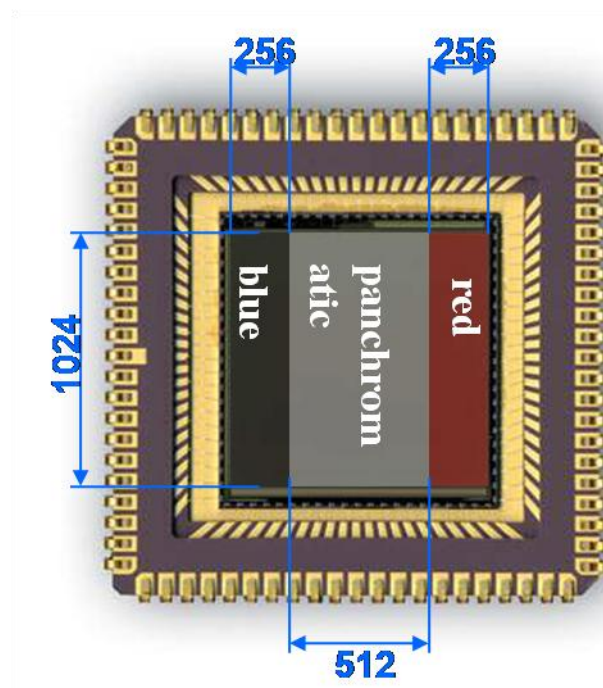


Abbildung 11: Star1000 Sensor mit aufgeklebten Farbfiler (Größenangaben in Pixel) [7]

Farbbilder können durch Überlagerung mehrerer versetzter Einzelbilder generiert werden. Hierfür ist es erforderlich, dass das gesamte Motiv mit dem panchromatischen, blauen und roten Sensorbereich abgelichtet wird. Anschließend ist eine Farbgenerierung durch Überlagerung der einzelnen Bilder möglich. Die Anzahl der notwendigen Einzelbilder, um ein 1024×1024 Pixel großes Farbbild zu generieren, hängt von dem gewählten Überlappungsbereich der Filterschichten ab und kann mit Formel (1) berechnet werden. Zwischen jedem Einzelbild wird die Kamera, je nach Überlappungsbereich, in axialer Richtung gedreht.

$$n = \frac{2 \cdot N - x}{x - c}, \quad (1)$$

Hierbei ist n die Anzahl der notwendigen Einzelbilder, N die Anzahl der Sensorpixel in horizontaler Richtung, x die Breite des Rot- und Blaufilters in Pixel sowie c die Überlappung der einzelnen Filterbereiche in Pixel zwischen zwei Einzelbildern.

Durch Einsetzen der HRC-Kamera Parameter ($N=1024$, $x=256$) in Gleichung (1) und Wahl eines Überlappungsbereiches von 20% ergibt sich, dass insgesamt

$$n = \frac{2 \cdot N - x}{x - c} = \frac{2 \cdot 1024 - 256}{256 - 51,2} = 8,75 \quad (2)$$

9 Einzelbilder und Rotationen notwendig sind, um daraus anschließend ein Farbbild zu generieren. Ohne Überlappungen sind 7 Einzelbilder nötig.

Die Farbkalibrierung wird mit Hilfe einer Farbskala, die am Rover angebracht ist, durchgeführt (Abbildung 12).

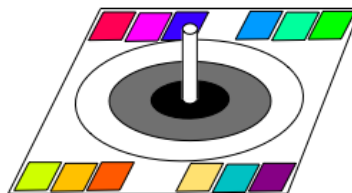


Abbildung 12: Farbskala auf dem Rover zur Farbkalibrierung [7]

Die verwendete Version der Kamera hat eine Brennweite von 100mm und einen Blendenwert der Größe 8, ist 60×65×129mm groß und wiegt 415g. Die finale Flugversion, die ebenfalls mit dem Star1000 Sensor ausgestattet ist, wird eine Brennweite von 200mm und einen Blendenwert von 16 haben.

Die Kamera muss sowohl an die widrigen Bedingungen auf der Reise zum Mars, als auch an die auf dem Mars herrschenden Bedingungen, angepasst sein. Es muss

gewährleistet sein, dass die Kamera in einem Temperaturbereich von -70°C bis $+70^{\circ}\text{C}$ (Operation Temperature) betrieben werden kann und den Bereich von -150°C bis $+90^{\circ}\text{C}$ (Non-Operation Temperature) deaktiviert oder im Bereitschaftsmodus funktionsfähig übersteht. Des Weiteren muss die Kamera auch große Temperaturunterschiede zwischen Marstag und Marsnacht, welche bis zu 165°C betragen [11], mindestens für die nominelle Operationsdauer von 180 Marstagen (Sols) überstehen. Außerdem muss die Kamera an die geringen Druckverhältnisse der Umgebung und die erhöhte Strahlungsbelastung während des Fluges und auf dem Mars angepasst werden. Weitere generelle Anforderungen an Instrumente für den Einsatz im Weltraum sind eine Robustheit gegenüber den beim Raketenstart auftretenden Vibrationen und Geräuschen, ein geringer Stromverbrauch und eine kleine Masse. Die einzelnen Systeme müssen so ausgelegt sein, dass sie sich untereinander nicht durch elektromagnetische Störstrahlung (EMI-Effekte) beeinträchtigen. Die Einhaltung aller notwendigen Richtlinien werden bereits in der Konzeptions- und Designphase der Mission bedacht und im Verlauf der Mission, sowohl im Instrumentenlevel als auch später im Raumorbiterlevel, mehrfach überprüft und getestet.

Diese hohen Anforderungen sind unter anderem dafür verantwortlich, dass keine kommerzielle Autofokus-Kamera verwendet werden kann. Auf dem Markt verfügbare Kameras sind nicht für den Einsatz im Weltraum qualifiziert und nur für Erdbedingungen entwickelt.

Als Fokussiermotor wird als Basislinie ein piezoelektronischer Motor verwendet. Die Wahl dieses Motors ist darin begründet, dass die Funktionalität bis -200°C laut Datenblatt und ersten Funktionalitätstests gegeben ist. In Abbildung 13 ist der Betriebsspannungsverlauf (blau) und Stromverlauf (rot) des Motors zu sehen. Es wird eine Spannung aufgebaut, die bei Erreichen eines bestimmten Spannungswertes den Motor zündet, welcher sich einen Schritt nach vorne bewegt. Der Motor kann mit Schrittfrequenzen bis in den kHz Bereich betrieben werden. Die Leistungsaufnahme steigt aber ebenfalls mit steigender Schrittfrequenz.

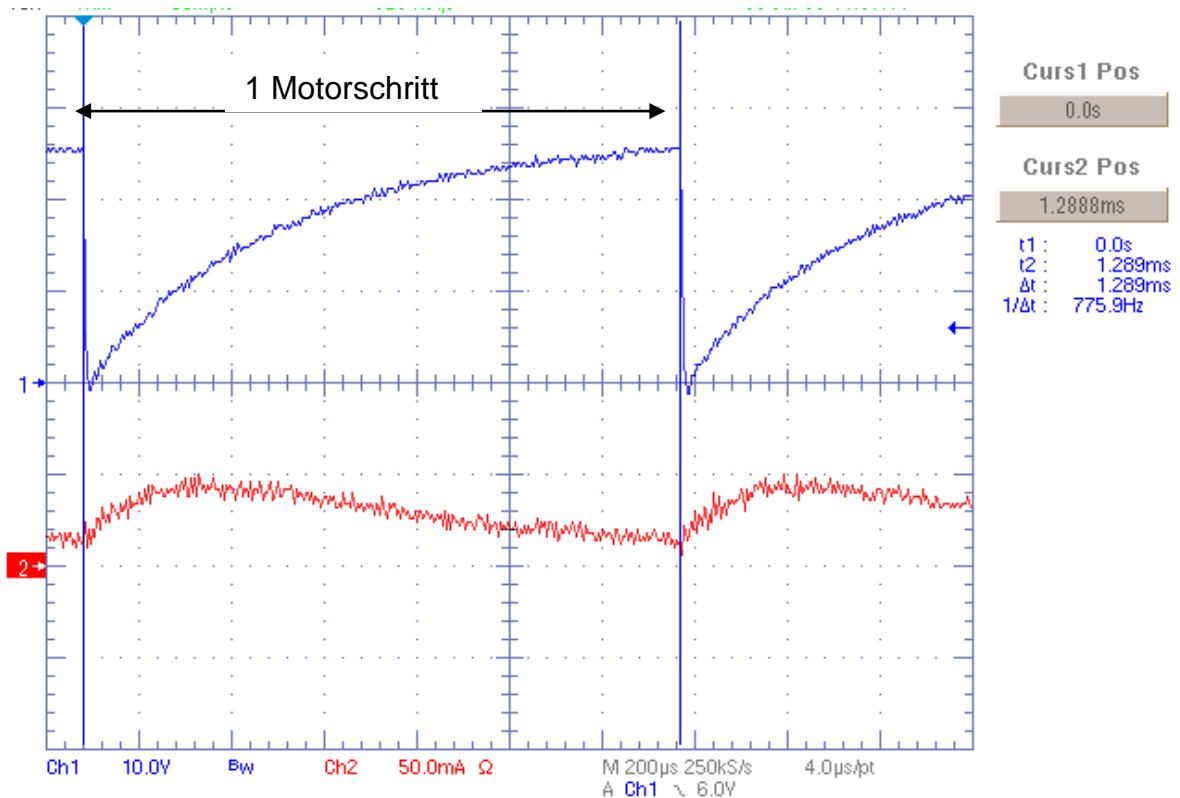


Abbildung 13: Spannungs- und Stromverläufe des Piezo Motor im Betrieb

Der Piezo Motor besitzt keine Endlagenschalter und auch keine Möglichkeit zur Positionsbestimmung der aktuellen Motorposition. Die starke, temperaturbedingte Schwankung der Schrittweite und die fehlende Möglichkeit, die aktuelle Motorposition anzugeben, erschweren den Fokussierungsvorgang erheblich. In Kapitel 4.1 wird genauer auf die Temperaturabhängigkeit des Piezo Motors eingegangen.

2.1.2 Wide Angle Kamera (WAC)

Neben der High Resolution Kamera (HRC) bildet die Wide Angle Kamera (WAC) den zweiten Instrumententeil des Panorama Kamerasystems (PanCam). Dieses System besteht wie in Abbildung 5 zu sehen ist aus zwei separaten Kameras, die 500mm voneinander entfernt sind. Dies ermöglicht eine Generation von Stereo-Bildern. Mit denen dann ein dreidimensionales Modell der Rover Umgebung (Digital Terrain Model, DTM) erstellt werden kann. Ein dreidimensionales Umgebungsmodell liefert wichtige Informationen für die Routenplanung des Rovers auf der Marsoberfläche. Die beiden Wide Angle Kameras bestehen aus jeweils einem Grauwerte CCD Sensor mit einer Auflösung von 1024×1024 Pixel. Farbbilder werden durch die Überlagerung mehrerer Bilder mit verschiedenen spektralen Filtern gewonnen. Es stehen insgesamt 12 verschiedene Filter zu Verfügung, die mit Hilfe eines Drehrades ausgewählt werden können (Filter Wheel). Das Blickfeld ist mit 34° größer als das Blickfeld der High Resolution Kamera und ist deshalb besonders für Panoramabilder geeignet. Eine

Abbildung einer WAC-Kamera und der mechanische Aufbau sind in Abbildung 14 zu sehen.

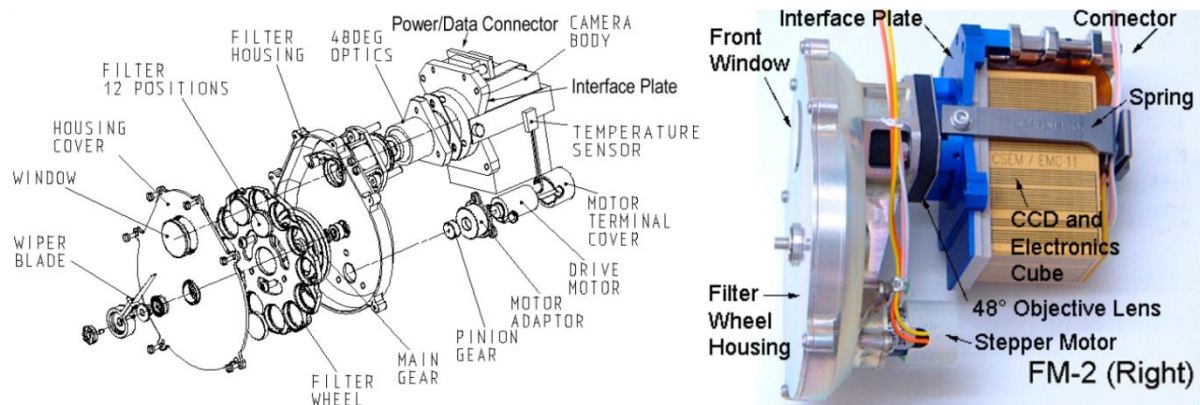


Abbildung 14: Wide Angle Camera Aufbau [7]

Die Wide Angle Camera wird am Mullard Space Science Laboratory des University College London entwickelt. Tabelle 1 stellt die beiden Kamerasysteme der ExoMars PanCam nochmals gegenüber.

Tabelle 1: Übersicht HRC und WAC

	HRC	WAC
Sensor:	1024x1024 Graustufen APS Sensor mit aufgeklebten Farbfilter	1024x1024 CCD Graustufen Sensor
Blickfeld:	8°	34°
Aussteuerbereich:	10 Bit = 1024 Grauwerte	10-16 Bit (variabel)
Datenvolumen:	32Mbit/img (Farbbild)	10Mbits/img
Durchschnittliche Leistung:	0.9W	1.80W
Masse (Breadboard):	415g	363g
Einsatztemperatur	-70°C - +70°C	-120°C - +50°C
Ruhebereich Temperatur:	-150°C - +90°C	-150°C - +50°C
Besonderheiten:	-Autofokus 1,5m – unendlich -Aufgeklebte Farbfilter zur Farbbild Generierung	-Stereofähigkeit -12 verschiedene Filter auswählbar -Farbbild Generierung möglich

2.2 Optik

In diesem Teilkapitel werden die Grundlagen der Optik erläutert, die zum wesentlichen Verständnis dieser Diplomarbeit wichtig sind. Hierzu zählen die Grundlagen der

Kameraoptik, eine Begriffserklärung der Schärfentiefe und hyperfokalen Distanz, sowie der Funktionsablauf einer Fokussierung. Die Optik hat für eine optimale Fokussierung eine sehr große Bedeutung und wird im weiteren Verlauf wieder aufgegriffen.

2.2.1 Kameraoptik

Eine vereinfachte Darstellung einer Kamera ist in Abbildung 15 zu sehen. Sie besteht aus einer Blende, einem Linsensystem und der Bildebene. Einer der Parameter einer Kamera ist, unter anderem, die Blendenzahl, die die Öffnungsgröße der Blende beschreibt. Je kleiner die Blende ist, desto Schärfer ist das Bild. Jedoch fällt bei einer kleinen Blende auch weniger Licht auf den Sensor. Ein weiterer wichtiger Kameraparameter ist die Brennweite f . Sie ist die Entfernung zwischen dem Mittelpunkt des Linsensystems und dem Brennpunkt der parallel zur optischen Achse einfallender Strahlen. Einen Zusammenhang der Gegenstandsweite g , Bildweite b und Brennweite f lässt sich mit Hilfe des geometrischen Strahlensatzes ermitteln. Für eine ideale Linse gilt die Linsen- oder Abbildungsgleichung [12]:

$$\frac{1}{b} + \frac{1}{g} = \frac{1}{f} \quad (3)$$

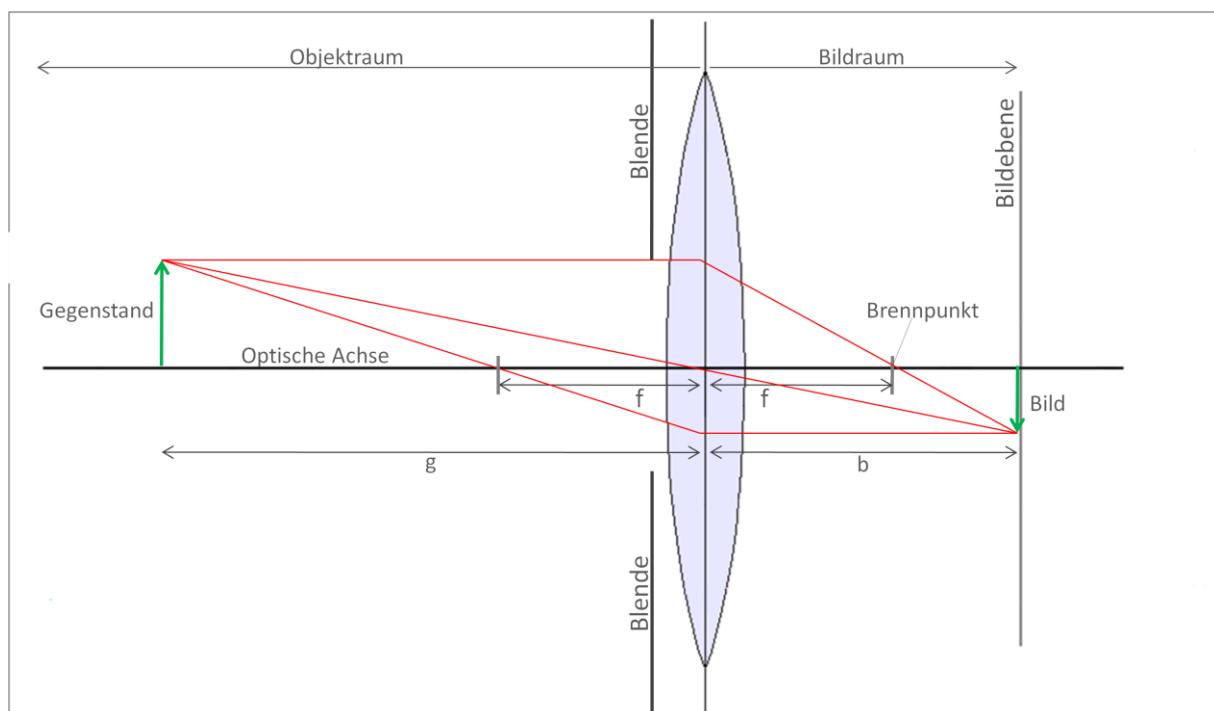


Abbildung 15: Kameraoptik vgl.[14]

Die für die Diplomarbeit benutzte Version der HRC-Kamera hat eine feste Blende von 8 und eine feste Brennweite von 100mm.

2.2.2 Schärfentiefe

Die Schärfentiefe gibt einen Bereich im Objektraum an, der bei einer unveränderten Fokussiereinstellung des Kamerasystems auf der Bildebene scharf abgebildet wird. Die Ausdehnung des Schärfentiefenbereiches wird von der Größe des Minstdurchmessers des Unschärfekreises Z bestimmt (siehe Abbildung 16). Ein fokussierter Punkt P im Objektraum wird auf der Bildebene als scharfer Punkt abgebildet. Befindet sich ein Punkt im Objektraum nicht in der Fokussierebene, so wird der Punkt in der Bildebene nicht als scharfer Punkt, sondern als unscharfer Kreis abgebildet. Je weiter der abzubildende Punkt im Objektraum von der fokussierten Ebene entfernt liegt, desto größer ist der Durchmesser des Unschärfekreises und desto unschärfer wird der im Bild dargestellte Punkt. Auftretende Unschärfe auf der Bildebene wird erst als Unschärfe erkennbar, wenn die Strahlengänge aus verschiedenen Entfernungen einen Unschärfekreis, der größer als der Minstdurchmesser Z ist, projizieren. In der Digitalfotografie ist Z der doppelte Pixeldurchmesser. Wie in Abbildung 16 zu sehen ist, erstreckt sich der Bereich des Objektraumes, der scharf dargestellt wird, bei Fokussierung des Kamerasystems auf den Punkt P , zwischen dem Nahpunkt N und Fernpunkt D . Alle Objekte, die sich in diesem Bereich befinden, werden auf dem Bild scharf dargestellt. Die Strahlengänge des Nahpunktes (rot) und des Fernpunktes (blau) haben Unschärfekreise, die genau dem Minstdurchmesser Z entsprechen. Der Strahlengang des fokussierten Punktes (grün) hat seinen Brennpunkt in der Bildebene und somit einen Durchmesser des Unschärfekreises von 0. Der Strahlengang der parallel zur optischen Achse einfallenden Strahlen (hellblau) hat einen Durchmesser des Schärfekreises von Z^∞ . Da Z^∞ größer als Z ist, werden Objekte, die sich weiter entfernt als der Fernpunkt D befinden, unscharf abgebildet.

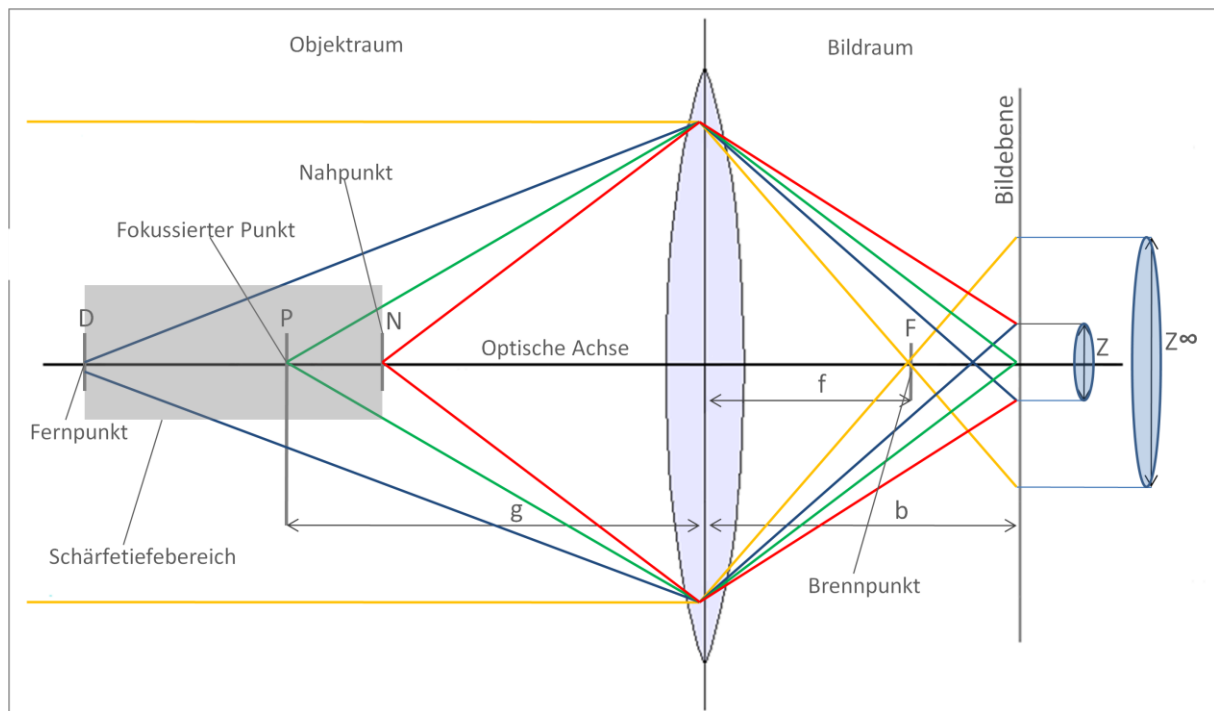


Abbildung 16: Schärfentiefe vgl.[14]

Der Abstand von dem Mittelpunkt des Linsensystems M zum Nahpunkt N und Fernpunkt D sind in Formeln 4 angegeben [15]:

Entfernung Nahpunkt:

$$d_n = \frac{g \cdot d_h}{d_n + (g - f)} \quad (4)$$

Entfernung Fernpunkt:

$$d_f = \frac{g \cdot d_h}{d_n - (g - f)} \quad (5)$$

Hierbei beschreibt g die Entfernung des fokussierten Objektes zum Mittelpunkt des Linsensystems M, b ist die Entfernung der Bildebene zum Linsensystem und f die Brennweite des Objektivs, d_h ist die hyperfokale Distanz und wird im folgenden Teilkapitel genau erläutert. In Abbildung 17 sind der Bereich der Schärfentiefe und die Unschärfe in den restlichen Bereichen genau zu erkennen.



Abbildung 17: Schärfentiefebereich eines Testbildes

2.2.3 Hyperfokale Distanz

Die hyperfokale Distanz beschreibt in einem Kamerasystem die Distanz auf die fokussiert werden muss, um den größtmöglichen Schärfentiefebereich zu bekommen. Bei einer Fokussierung des Kamerasystems auf die hyperfokale Distanz erstreckt sich der Schärfentiefebereich von der halben hyperfokalen Distanz bis unendlich. In Abbildung 18 ist dies gut zu erkennen, da der zulässige Durchmesser des Unschärfekreises Z auf der Bildebene genau von dem Strahlengang des unendlich entfernten Objektes (blau) und dem Strahlenganges des Nahpunktes (rot), welcher in einer Entfernung der halben hyperfokal Distanz liegt, begrenzt wird.

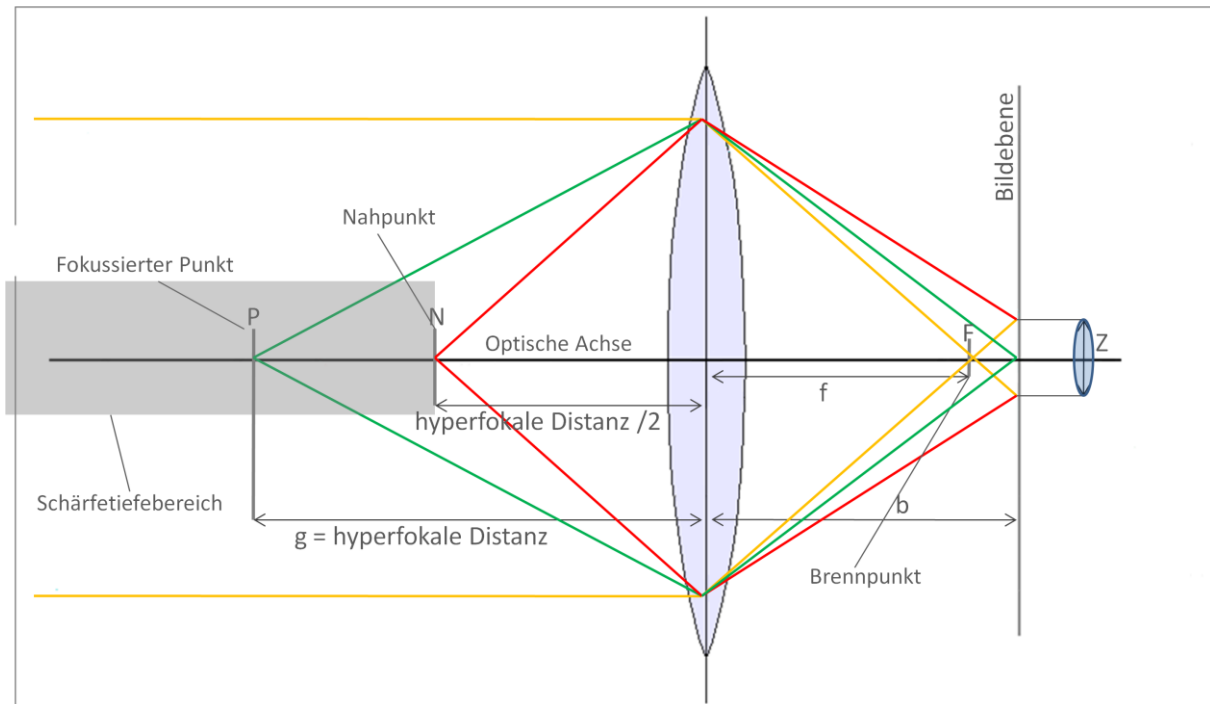


Abbildung 18: Strahlengang hyperfokale Distanz vgl.[14]

Mathematisch lässt sich die hyperfokale Distanz folgendermaßen bestimmen [13]:

$$d_h = \frac{f^2}{K \cdot Z} \quad (6)$$

Hierbei ist f die reale Brennweite, K der Blendenwert und Z der Mindestdurchmesser des Unschärfekreises. Durch einsetzen der HRC-Kamera Parameter ($f=100\text{mm}$, $K=8$, $Z=2 \cdot 0,15\mu\text{m}$) errechnet sich die hyperfokale Distanz:

$$d_h = \frac{0,1^2}{8 \cdot 30 \cdot 10^{-6}} \text{m} = 41,67\text{m} \quad (7)$$

Es folgt, dass der Entfernungsbereich, von $\frac{d_h}{2} = 20,835\text{m}$ bis unendlich, scharf abgebildet wird, wenn die HRC-Kamera auf eine Entfernung von $d_h = 41,67\text{m}$ fokussiert ist (Abbildung 19). Die dunklen Bereiche in dem HRC-Testbild sind die in Abbildung 11 gezeigten Rot- bzw. Blaufilter, die zu einer Farbbildgenerierung notwendig sind. Die hyperfokale Distanz ist bei der Fokussierung ein wichtiger Wert, da diese den größten möglichen Schärfentiefenbereich angibt und somit zum Beispiel als Ausgangsstellung des Fokussiermotors verwendet werden oder auch die Endposition des beweglichen Linsensystems in eine Richtung angeben kann.

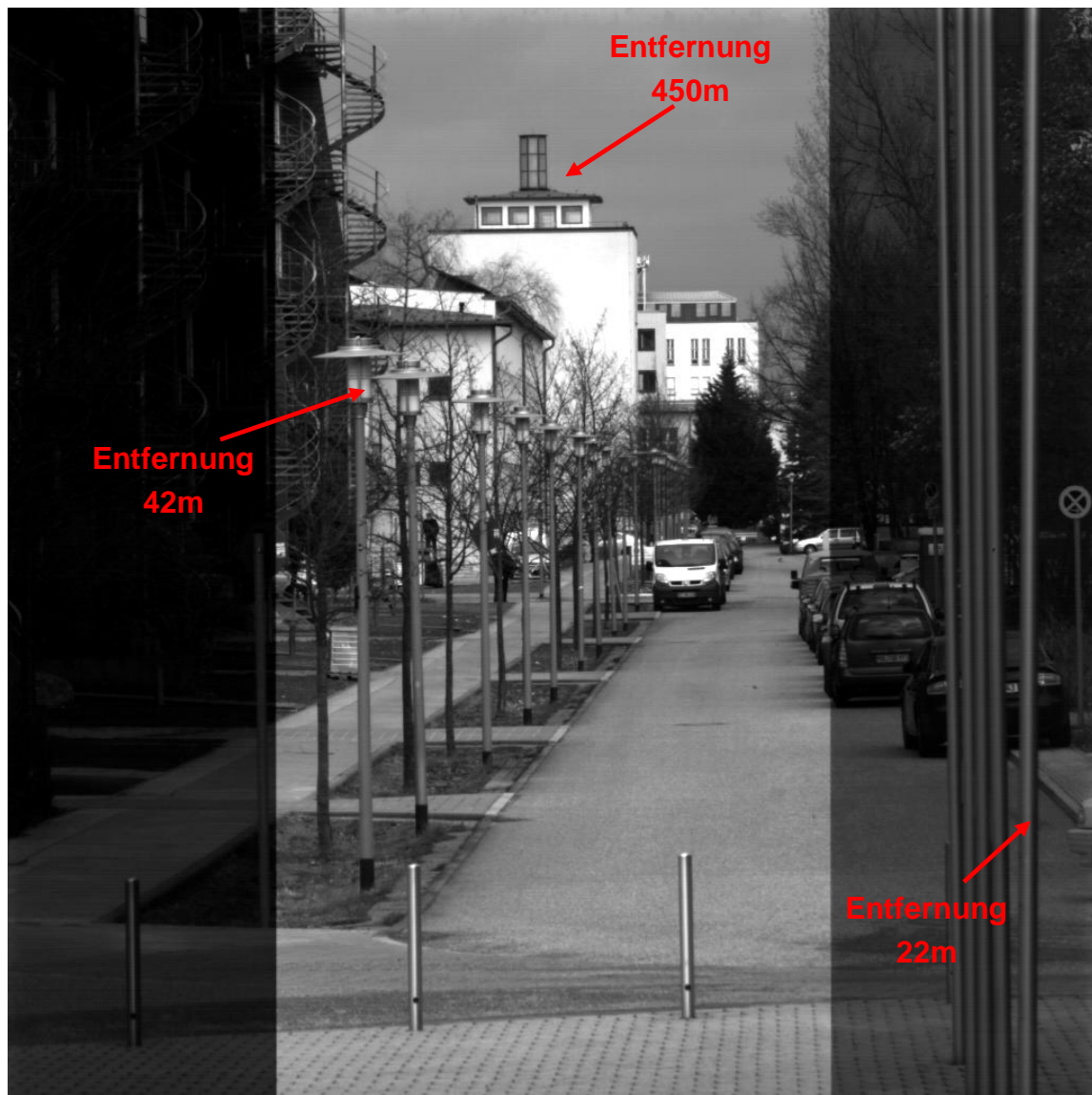


Abbildung 19: Beispielbild der Hyperfokaldistanz

2.2.4 Fokussierung

Fokussierfähige Kamerasysteme besitzen die Eigenschaft den im vorherigen Kapitel beschriebenen Schärfetiefenbereich im Objektraum zu verschieben, um Objekte, die nicht im ursprünglichen Schärfebereich liegen, scharf auf dem Sensor abzubilden. Dies geschieht durch ein in Richtung der optischen Achse bewegliches Linsensystems. Wie in Abbildung 16 zu sehen ist, hat die Position des Linsensystems einen direkten Einfluss auf den Durchmesser des Unschärfekreises. Bei einer Fokussierung wird das Linsensystem oder einzelne Linsen dieses Systems so verschoben, dass der Unschärfekreis eines Punktes im Objektbereich kleiner als der Minstdurchmesser wird. Ist dies der Fall, wird das Objekt scharf dargestellt. Um mit der verwendeten Version der HRC-Kamera den geforderten Bereich von 1,5m bis unendlich scharf Abbilden zu können, ist es notwendig das Linsensystem um insgesamt ca. 7mm bewegen zu können.

Bei Fokussiersystemen wird zwischen aktiven und passiven Systemen unterschieden. Aktive Systeme bestimmen aktiv die Entfernung zum fokussierenden Objekt mit einem Ultraschall oder Laser Entfernungsmesser und positionieren daraufhin die Linse an eine optimale Stelle. Die Informationen, wo sich die optimale Linsenposition in Abhängigkeit von der Objektentfernung befindet, sind in einer Tabelle abgespeichert, auf die die Kamerasoftware zugreift. Diese Variante ist sehr schnell und zuverlässig, solange das richtige Objekt vom Entfernungsmesser detektiert wurde. Ein Nachteil ist, dass zusätzliche Hardware erforderlich ist und dadurch das System komplexer wird. Passive Fokussiersysteme bestimmen eine optimale Linsenposition ohne zusätzliche Hilfsmittel, nur auf der Basis der Bildauswertung. Kommerzielle Kameras kombinieren oftmals beide Fokussiervarianten. Der PanCam-HRC Autofokus Mechanismus ist ohne aktive Hilfsmittel ausgelegt, welche zusätzliches Gewicht, höheren Energieverbrauch und einen zusätzlichen Risikofaktor im Bezug auf den Weltraumeinsatz darstellen würden. Die Fokussierung der HRC Kamera erfolgt deshalb passiv nur durch Bildauswertung. Das passive Verfahren der HRC-Kamera wird im Rahmen dieser Diplomarbeit entwickelt. Im Verlauf der Arbeit werden mehrere Verfahren der Bildauswertung im Bezug auf die Bildschärfe vorgestellt. Die Bildauswertung ist notwendig, um anschließend den Motor und das Linsensystem korrekt zu positionieren und so die Bildschärfe zu optimieren.

3 Qualitätsbestimmung digitaler Bilder

Die Anforderungen an die Qualität der HRC-Bilder sind hoch, um eine Verwendung der Bilder für wissenschaftliche Auswertungen zu ermöglichen. Qualitativ hochwertige Bilder zeichnen sich durch eine optimale Bildschärfe und eine optimale Belichtung der zu betrachtenden Bildbereiche aus. Die Bildbereiche sind durch den Benutzer in der Größe, wie auch in der Position im Gesamtbild, änderbar (vgl. Abbildung 97). Sie können aus dem gesamten Bildbereich oder aber nur aus Teilbereichen des Gesamtbildes bestehen. Die Wahl der Bildbereiche erfolgt durch die Wissenschaftler auf der Erde und ist Abhängig von den durchgeführten Untersuchungen. In diesem Kapitel werden zuerst einige Verfahren zur Schärfestimmung digitaler Bilder erläutert und in Tests gegenübergestellt. Die Schärfestimmung ist die Grundlage für eine passive automatische Fokussierung und wichtig für die verschiedenen Suchstrategien, die im nächsten Kapitel behandelt werden. In diesem Kapitel werden sowohl Tests mit Matlab Simulationen als auch reale Tests mit der HRC-Kamera durchgeführt, um die Funktionalität der verschiedenen Verfahren zur Schärfestimmung zu verifizieren. Des Weiteren wird ein Verfahren zur Bestimmung einer optimalen Belichtungszeit vorgestellt.

Im Verlauf dieser Diplomarbeit wird ein Bild als eine Matrix $I(x,y)$ mit $x \in \{0, \dots, N-1\}$, $y \in \{0, \dots, M-1\}$ angegeben, wobei N die Zeilenanzahl und M die Spaltenanzahl des Bildes I beschreibt. Jeder Matrixeintrag entspricht einem Bildpixel und gibt einen Grauwert an. Je nach Bildformat sind unterschiedlich viele Grauwerte möglich. Bei Grauwertbildern im 8-Bit-Format sind 256 Grauwerte darstellbar. Eine 0 entspricht einem schwarzen Bildpunkt und eine 255 einem weißen Bildpunkt. Bildpunkte mit Werten zwischen 1 und 254 stellen verschiedene Grauwerte dar. Die HRC-Kamera hat eine Grauwertauflösung von 10-Bit. Es können 1024 Grauwerte von 0 bis 1023 dargestellt werden. Diese hohe Auflösung ist notwendig, um Bildbereiche, die nicht optimal belichtet sind - zum Beispiel Bereiche, die im Schatten von Felsen liegen - besser auflösen zu können.

3.1 Verfahren zur Schärfestimmung digitaler Bilder

Zur Verdeutlichung wie Unschärfe auf Bildern abgebildet wird, ist in Abbildung 20 eine Linie zu sehen, die verschieden scharf aufgenommen ist. Die Pixelwerte einer Zeile der einzelnen Bilder sind in Abbildung 21 aufgetragen. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Kanten der scharfen Linie (Linie1, blau) sehr steil abfallen. Je unschärfer die Linie ist, desto flacher verläuft der Übergang zwischen dem Bildhintergrund und der schwarzen Linie und desto weiter ausgedehnt ist dieser.

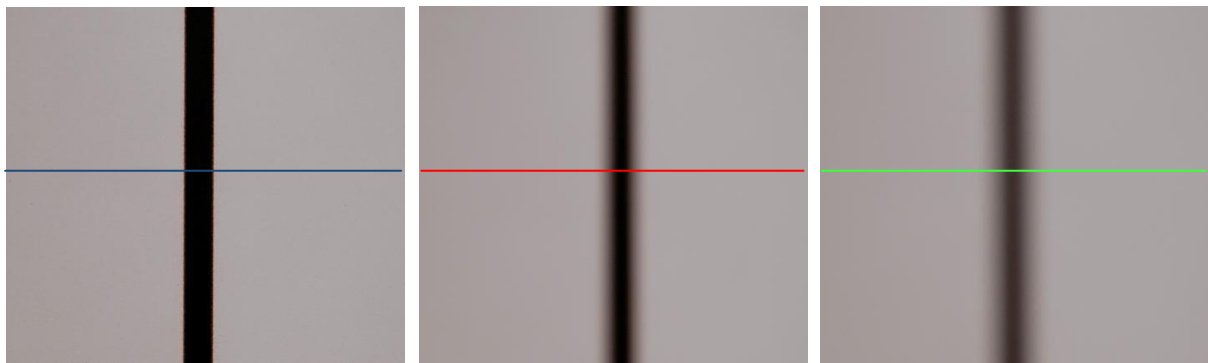


Abbildung 20: unterschiedlich scharf aufgenommene Linien mit betrachteten Zeilen

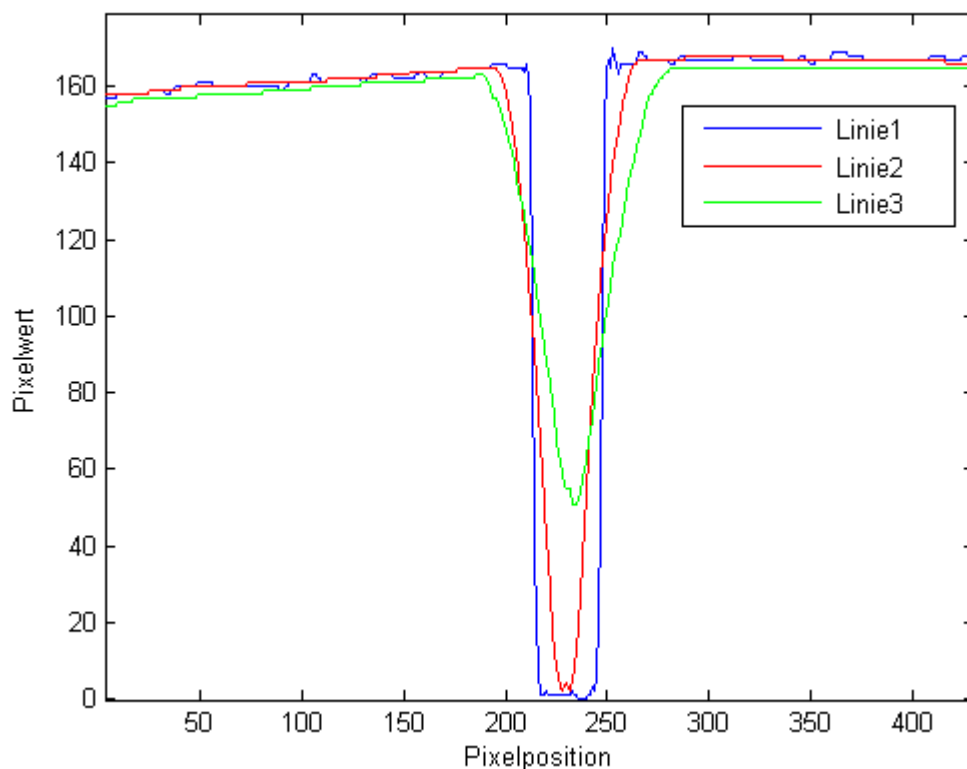


Abbildung 21: Zeilenprofil der Pixelwerte von den drei Linien-Bildern unterschiedlicher Schärfe

In [16-20] sind einige Verfahren zur Schärfestimmung digitaler Bilder erläutert. Die in [16-20] durchgeführten Vergleiche der einzelnen Methoden können für die Bildschärferechnung der HRC-Kamera nicht direkt übernommen werden, da die durchgeführten Tests stark von den jeweiligen Testumgebungen abhängen und keine allgemeine Gültigkeit der Ergebnisse für die HRC-Anforderungen auf der Marsoberfläche abgeleitet werden kann. Aus diesem Grund werden im Rahmen dieser Diplomarbeit einige in der Literatur anerkannte Methoden [16-20] gezielt für den Einsatz auf der Marsoberfläche getestet. Der genaue Testaufbau und die durchgeführten Test werden später ausführlich behandelt. Im Folgenden werden die einzelnen Methoden genau erläutert.

3.1.1 Spektrale Entropie

In dieser Methode wird die Gleichmäßigkeit des Bildspektrums berechnet, welche nach [16] Aussagen über die Bildschärfe liefert. Hierzu wird das gesamte Bild $I(x,y)$ in 8×8 Pixel große überlappungsfreie Teilbilder f aufgeteilt (Abbildung 22). Für jedes Teilbild f wird nun das Spektrum mit Hilfe einer 8×8 diskreten Kosinustransformation (DCT) berechnet.

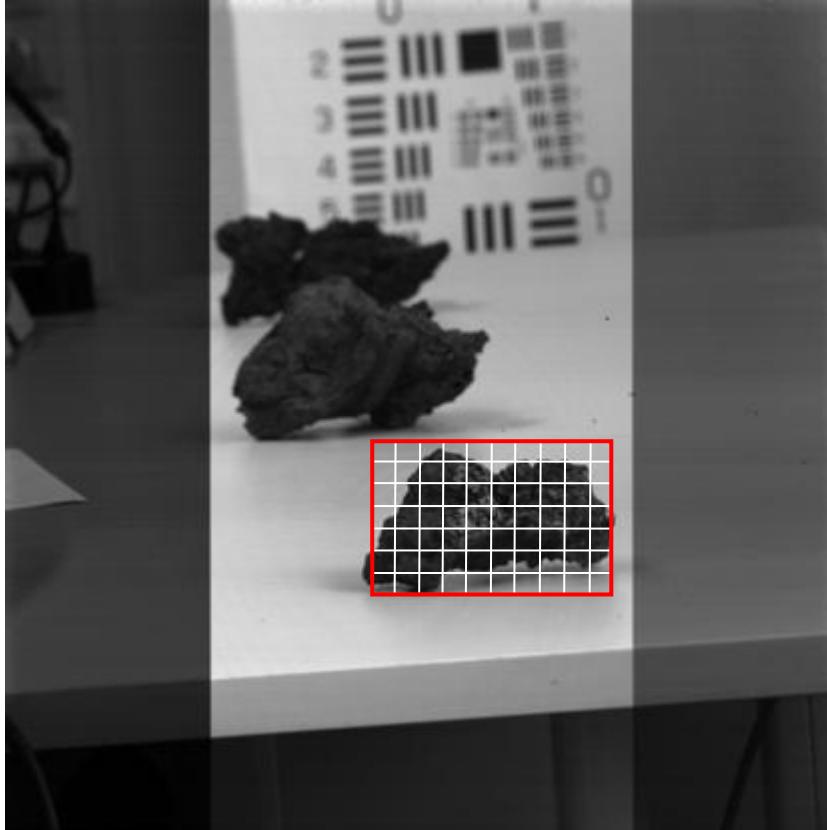


Abbildung 22: Aufteilung Fokussierfenster (rot) in 8×8 Teilbilder

Hieraus wird die normalisierte DCT (nDCT) $\tilde{F}_{w,v}$ des Teilbildes bestimmt, indem der Betrag der einzelnen Spektralwerte $F_{w,v}$ durch die Summe aller Spektralwerte dividiert wird.

$$\tilde{F}_{w,v} = \frac{F_{w,v}}{\sum_{w=0}^{N-1} \sum_{v=0}^{M-1} (F_{w,v})} \quad (8)$$

$F_{w,v}$ stellt die DCT transformierte Matrix der Ausgangsteilbilder dar [16].

$$F_{w,v} = \frac{2 \cdot C(w)C(v)}{N} \cdot \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{M-1} f(i,j) \cdot \cos\left(\frac{(2i+1) \cdot w \cdot \pi}{2 \cdot M}\right) \cdot \cos\left(\frac{(2j+1) \cdot v \cdot \pi}{2 \cdot N}\right) \quad (9)$$

$f(i,j)$ sind die Grauwerte der jeweiligen Bildpunkte des 8×8 Teilbildes f mit $x \in \{0, \dots, N-1\}$, $y \in \{0, \dots, M-1\}$ und $F_{w,v}$ sind die resultierenden 8×8 DCT Koeffizienten mit $w \in \{0, \dots, N-1\}$, $v \in \{0, \dots, M-1\}$. Da die Teilbilder in diesem Fall die Dimension von 8×8 haben ist die Zeilen- und Spaltenanzahl $N=M=8$, $C(w)$ und $C(v)$ sind die Konstanten:

$$C(n) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}}, & n = 0 \\ 1, & n \neq 0 \end{cases} \quad (10)$$

Beispielhaft sind in Abbildung 23 und 24 ein fokussiertes Foto und ein unscharfes Foto mit zugehörigem DCT Spektrum dargestellt. Das Spektrum des fokussierten Fotos ist im Vergleich zu dem DCT Spektrum des unscharfen Fotos gleichmäßiger verteilt. Das Spektrum des unscharfen Fotos hat die größte Intensität in der linken oberen Ecke, was auf geringe Bildfrequenzen hindeutet. Bildfrequenzen sind so definiert, dass Frequenzen umso höher sind, desto mehr klar definierte Kanten bzw. Bilddetails sich in einem Bild befinden. Je unschärfer ein Bild ist, umso verschwommener werden Kanten in dem Foto abgebildet.

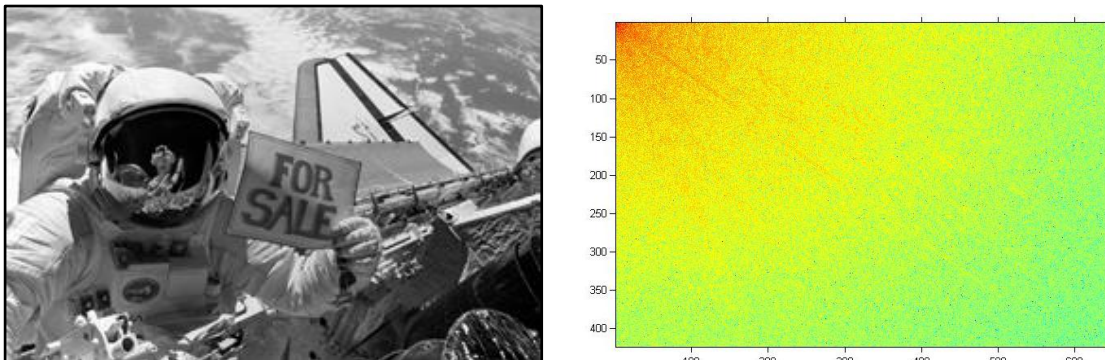


Abbildung 23: DCT Spektrum (rechts) eines scharfen Ausgangsbildes (links) [22]

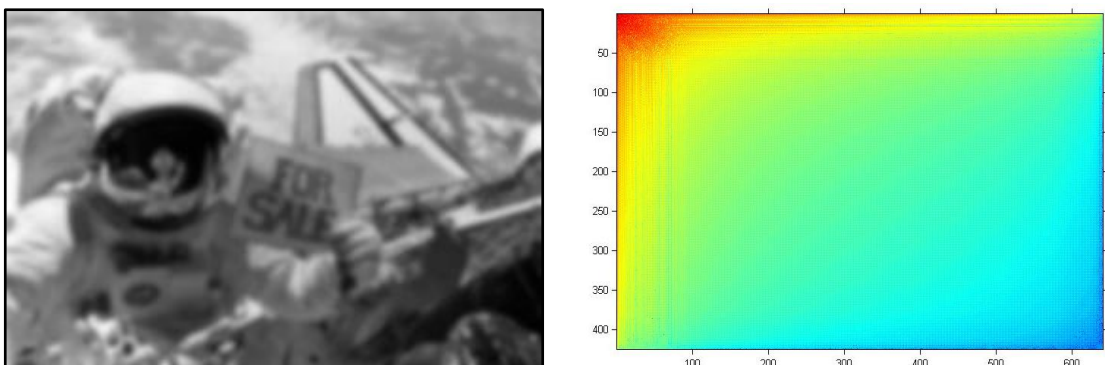


Abbildung 24: DCT Spektrum (rechts) eines unscharfen Ausgangsbildes (links) [22]

Das nDCT Spektrum hat die Eigenschaft, dass alle Werte zu 1 aufsummiert werden. Es kann somit als eine Wahrscheinlichkeitsverteilungsmatrix angesehen werden. Jeder Eintrag stellt somit die Auftrittswahrscheinlichkeit einer Bildfrequenz dar.

Um nun ein Maß für die Gleichmäßigkeit der spektralen Verteilung von den Teilbildern zu bekommen wird aus dem nDCT Spektrum die Entropie bestimmt.

Die Entropie gibt den mittleren Informationsgehalt der Eingabesequenz wieder, p ist die Auftrittswahrscheinlichkeit eines Ereignisses aus einem endlichen Alphabets Z . Die eindimensionale Form der Entropie nach Shannon lautet [21]

$$H_S = - \sum_{i \in I} p_i \log_2 p_i \quad (11)$$

Für kleine p kann der Ausdruck $-\log_2 p_i$ durch $(1-p)$ approximiert werden [21]. Durch Einsetzen der Approximation in Formel (11) entsteht die so genannte quadratische Vajda Entropie [21]:

$$H_V = \sum_{i \in I} p_i (1 - p_i) = \sum_{i \in I} p_i - \sum_{i \in I} p_i^2 = 1 - \sum_{i \in I} p_i^2 \quad (12)$$

Um nun die Entropie des zweidimensionalen nDCT Spektrums \tilde{F} bestimmen zu können werden die nDCT Koeffizienten $\tilde{F}_{w,v}$ für die Wahrscheinlichkeitsverteilung p_i in Gleichung (12) eingesetzt. Die resultierende Gleichung der zweidimensionalen Entropie des nDCT Spektrums des 8×8 Teilbildes f hat die Form [16]:

$$E(f) = 1 - \sum_{w=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} \tilde{F}_{w,v}^2 \quad (13)$$

Die spektrale Entropie des gesamten Bildes wird nun berechnet indem der Mittelwert aus allen spektralen Entropien der 8×8 Pixel großer Teilbilder bestimmt wird.

$$E_{gesamt} = \frac{\sum_f E(f)}{\text{Anzahl Teilbilder}} \quad (14)$$

Im weiteren Verlauf der Diplomarbeit, sowie in der Umsetzung des Algorithmus in C++, wird dieses Verfahren als Bayes DCT beschrieben.

3.1.2 Sum Modulus Difference (SMD)

Eine einfache Methode zur Kontrastbestimmung digitaler Bilder ist das Sum Modulus Difference (SMD) Verfahren [17,20]. Bei diesem Verfahren wird das gesamte Bild der Größe $N \times M$ durchlaufen und die Differenz jeweils benachbarter Pixelwerte berechnet und aufsummiert. Je größer der SMD Wert eines Bildes ist desto größer ist auch der Gesamtkontrast und somit die Schärfe des Bildes. S_x stellt den Kantengradienten in x -Richtung dar, welcher horizontale Kanten detektiert.

$$S_x = \frac{1}{N \cdot M} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} |I(x, y) - I(x-1, y)| \quad (15)$$

Analog hat der Kantengradient in y-Richtung die Form S_y und erfasst vertikale Kanten.

$$S_y = \frac{1}{N \cdot M} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} |I(x, y) - I(x, y-1)| \quad (16)$$

Falls ein Bild nur vertikale- bzw. horizontale Kanten in die Detektionsrichtung aufweist ist der SMD Wert 0, obwohl sich Kanten in dem Bild befinden. Dieser Nachteil kann vermieden werden, indem sowohl S_x als auch S_y zur Bestimmung des SMD Wertes benutzt werden:

$$S = \sqrt{(S_x^2 + S_y^2)} \quad (17)$$

3.1.3 Energie des Bildgradienten

Eines ähnliches Verfahren ist die Bestimmung des Bildgradienten [23]. Hierbei wird das Bild ebenfalls durchlaufen und die Summe des Betrages der Pixelabweichungen in x- als auch in y-Richtung nach folgendem Schema bestimmt:

$$S = \frac{1}{N \cdot M} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} (I_x(x, y) + I_y(x, y)), \quad (18)$$

mit

$$I_x(x, y) = |I(x+1, y) - I(x, y)| \text{ und } I_y(x, y) = |I(x, y+1) - I(x, y)|$$

3.1.4 Grauwertvarianz

Bei diesem Verfahren findet keine direkte Kantendetektion, wie die in den vorgehenden zwei Verfahren statt, sondern es wird ein statistischer Wert berechnet der Aufschluss über die Bildschärfe gibt [17,19].

Die Grauwertvarianz eines Bildes I wird bestimmt, indem die Abweichung jedes Pixelwertes $I(x, y)$ vom Mittelwert μ aller im Bild I vorkommenden Pixelwerte berechnet und aufsummiert wird (Formel 19 und 20). Dies ist identisch mit einer mathematischen Varianzberechnung [24]:

$$S = \frac{1}{N \cdot M} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} (I(x, y) - \mu)^2 \quad (19)$$

Wobei μ den Mittelwert aller im Bild I vorkommenden Pixelwerte darstellt.

$$\mu = \frac{1}{N \cdot M} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} I(x, y) \quad (20)$$

Der Kontrast eines Bildes ist umso höher, je größer die Grauwertvarianz S des Bildes ist.

3.1.5 Tenengrad

Ein etwas komplexeres Verfahren zur Bildschärfestimmung ist das Tenengrad Verfahren [17]. Hierbei wird sowohl ein horizontaler i_x wie auch vertikaler i_y Sobel Operator zur Kantendetektion eingesetzt.

$$i_x = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ und } i_y = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} \quad (21)$$

Der Schärfewert des Bildes wird berechnet, indem das Ausgangsbild I mit den Sobeloperatornmatrizen i_x und i_y gefiltert wird, und anschließend alle Werte der Filtermatrix S aufsummiert werden:

$$S = \frac{1}{N \cdot M} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} S(x, y)^2, \quad (22)$$

mit

$$S(x, y) = \sqrt{(i_x * I(x, y))^2 + (i_y * I(x, y))^2} \quad (23)$$

In Formel (23) ist $*$ der Faltungsoperator, der in diesem Fall zweidimensionalen linearen Faltung eines Ausgangsbildes f mit einem Fenster h [25]:

$$g = f * h \quad (24)$$

$$g_{i,j} = \sum_{u=0}^{\infty} \sum_{v=0}^{\infty} h_{v,u} \cdot f_{i-v,j-u} = \sum_{u=\frac{M-1}{2}}^{\frac{M-1}{2}} \sum_{v=\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}} h_{v,u} \cdot f_{i-v,j-u} \quad (25)$$

Die Indizes des Fensters h sind in einem Bereich von $x \in \{0, \dots, N-1\}$, $y \in \{0, \dots, M-1\}$ definiert, wobei in diesem Fall die Sobeloperatoren eine Dimension von 3×3 aufweisen und somit $M=N=3$ ist.

In den Abbildungen 25 und 26 sind die Unterschiede der Bildfaltungen zwischen einem scharfen und unscharfen Ausgangsbildes zu erkennen. Nach der Faltung des Ausgangsbildes mit den Sobeloperatoren in x - und y - Richtung sind nur alle Kanten des Bildes zu erkennen, die je nach Bildschärfe des Ausgangsbildes mehr oder weniger gegeben sind.



Abbildung 25: Tenengrad gefiltertes Bild (rechts) eines scharfen Ausgangsbildes (links)[22]



Abbildung 26: Tenengrad gefiltertes Bild (rechts) eines unscharfen Ausgangsbildes (links) [22]

Die resultierenden Faltungsbilder mit den Sobel Operatoren in x - und y -Richtung sind in Abbildung 27 für ein scharfes Ausgangsbild und Abbildung 28 für ein unscharfes Ausgangsbild zu sehen. Der Sobeloperator in x -Richtung erkennt horizontale Kanten, der Sobeloperator in y -Richtung erkennt vertikale Kanten.

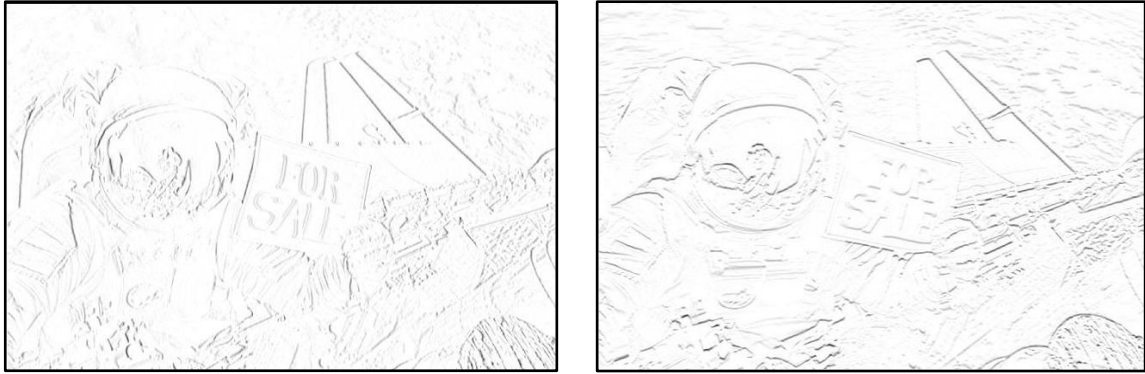


Abbildung 27: Mit Sobel Operator in x-Richtung (links) und y-Richtung (rechts) gefiltertes scharfes Ausgangsbild

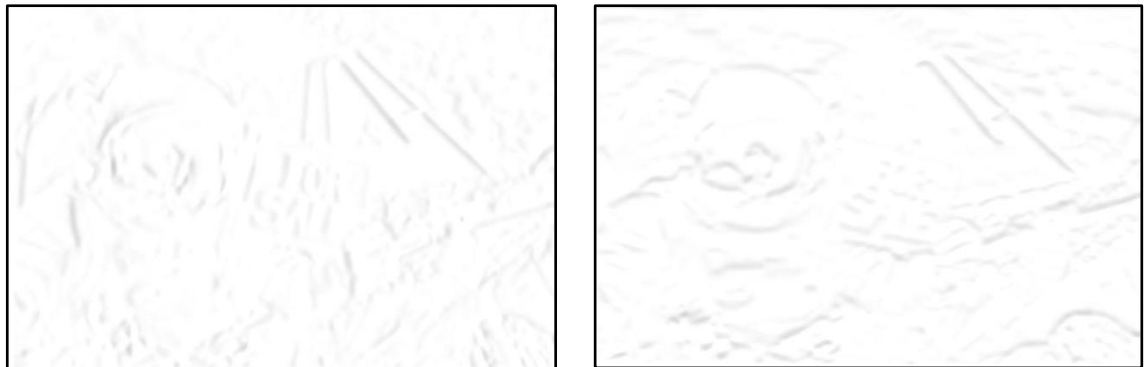


Abbildung 28: Mit Sobel Operator in x-Richtung (links) und y-Richtung (rechts) gefiltertes unscharfes Ausgangsbild

3.1.6 Laplace

Das Laplace Verfahren [17] ist dem Tenengrad Verfahren sehr ähnlich. Anstelle der beiden Sobeloperatoren wird hier der Laplaceoperator L verwendet.

$$L = \frac{1}{6} \begin{bmatrix} 1 & 4 & 1 \\ 4 & -20 & 4 \\ 1 & 4 & 1 \end{bmatrix} \quad (26)$$

Die Bildschärfe S wird über eine Summierung aller Werte der Filterung der Bildmatrix I mit dem Laplaceoperator L errechnet:

$$S = \frac{1}{N \cdot M} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} S(x,y)^2, \quad (27)$$

mit der resultierenden Ergebnismatrix der Filterung $S(x,y)$

$$S(x,y) = \sqrt{(L * I(x,y))^2} \quad (28)$$

In Gleichung (28) ist $*$ wieder der Faltungsoperator (vgl. Gleichung (25)).

Ein Vergleich zweier Laplace gefilterter Ausgangsbilder zeigt, dass in einem scharfen Bild (Abbildung 29) mehr Kanten detektiert werden als in einem unscharfen Bild (Abbildung 30)

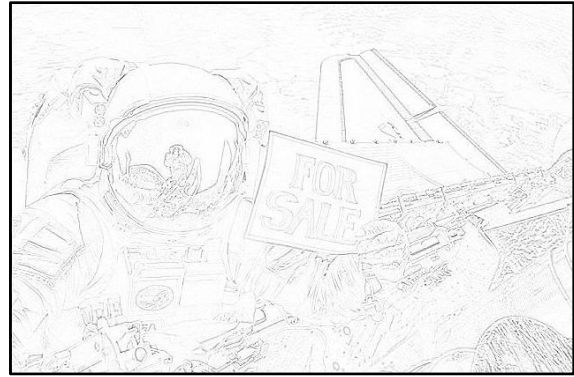


Abbildung 29: Laplace gefiltertes Bild (rechts) eines scharfen Ausgangsbildes (links) [22]



Abbildung 30: Laplace gefiltertes Bild (rechts) eines unscharfen Ausgangsbildes (links) [22]

Da der Schärfewert S eines Bildes alle im Bild vorkommenden Kanten aufsummiert, besitzt ein Bild eine höhere Schärfe je höher der Wert S des Bildes ist.

3.2 Vergleich und Bewertung der Methoden zur Schärfestimmung mit Matlab

Die im vorherigen Kapitel vorgestellten Algorithmen zur Bestimmung der Bildschärfe von digitalen Bildern werden in diesem Kapitel auf ihre Funktionalität hin überprüft. Hierbei werden scharfe Referenzbilder, mit verschiedenen anwendungsbezogenen Motiven, nach dem in Abbildung 31 gezeigten Schema bearbeitet. Hierbei werden die Referenzbilder mit Hilfe eines Gaußfilters verschieden stark unschärfer gezeichnet, Testbild $\sigma=0$ entspricht dem scharfen Ausgangsbild. Mit steigendem σ nimmt die Unschärfe zu. Vor der Unschärfefilterung kann zu Testzwecken die Bildhelligkeit mit dem Parameter b der auf die einzelnen Bildmatrixelemente multipliziert wird geändert

werden. Es kann ebenfalls ein zusätzliches Rauschen mit der Intensität r hinzuaddiert werden. Das Rauschen wird wie in Formel (29) angegeben zu der Bildmatrix I hinzuaddiert. Verrauschte Pixelwerte, die größer oder kleiner der darstellbaren Grauwerte sind, werden auf diesen Bereich begrenzt. Hierbei ist randn eine normalverteilte Zufallszahl mit einer Varianz $\sigma_{\text{Noise}}^2 = 1$ einer Standardabweichung $\sigma_{\text{Noise}} = 1$ sowie einem Mittelwert von 0, D ist die Differenz des größten und kleinsten in I vorkommenden Pixelwertes, r die einstellbare Intensität.

$$I_{\text{Rauschen}}(x,y) = I(x,y) + (\text{randn} * D * r); \quad (29)$$

Anschließend werden die Schärfewerte mit den vorgestellten Schärfelgorithmen berechnet.

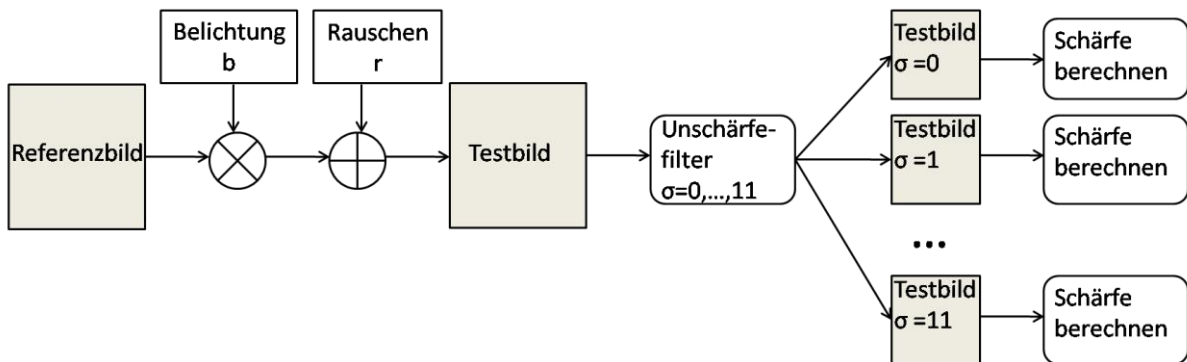


Abbildung 31: Blockdiagramm des Matlab-Testablaufes

In Abbildungen 32-34 sind die benutzten Referenzbilder zu erkennen. Es wurden Motive ausgewählt, die während der Mission auf der Marsoberfläche zu erwarten sind. Hierbei handelt es sich um ein technisches Motiv, das in diesem Fall den NASA Cliffbot-Rover zeigt (Abbildung 32). Technische Strukturen während der Mission stellen vor allem Aufnahmen von der Humboldt Nutzlast und Aufnahmen vom Rover selbst dar. Zwei weitere Referenzbilder stellen einen Lavastein in Detailaufnahme (Abbildung 34), sowie ein Panorama Foto der Marsoberfläche (Abbildung 33), aufgenommen während der Mars Pathfinder Mission der NASA, dar. Beide Szenarien sind ebenfalls anwendungsbezogene Motive, die während der Mission von der HRC-Kamera aufgenommen werden sollen. Zur Berechnung der Schärfewerte werden nur Bildpunkte verwendet, die innerhalb des Fokussierfensters (rote Markierung) liegen.

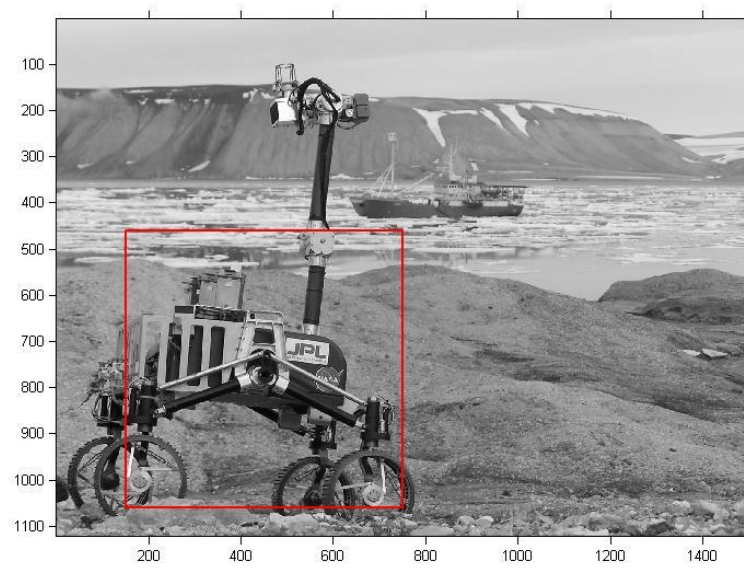


Abbildung 32: Referenzbild AMASE Rover [26]

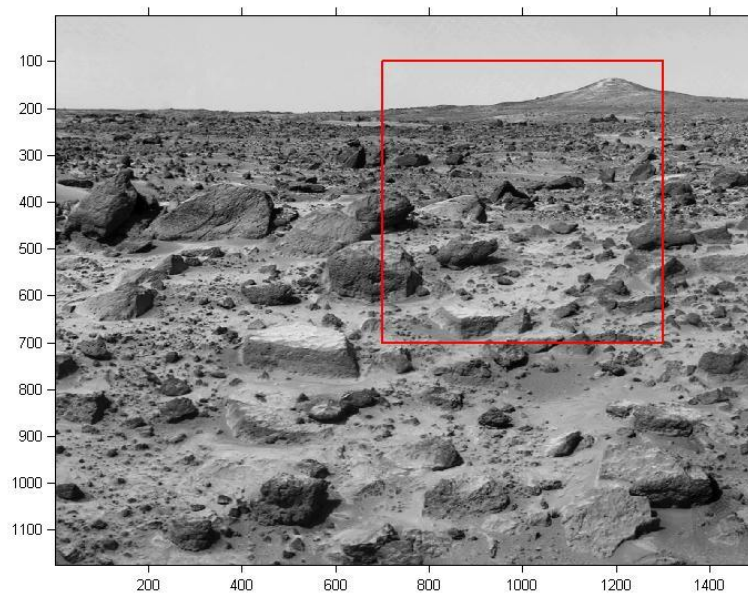


Abbildung 33: Referenzbild Mars „TwinPeaks“ [27]

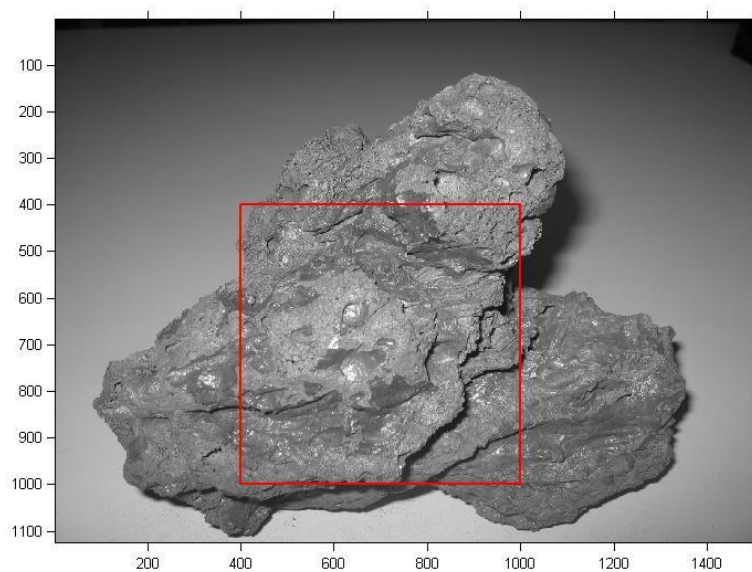


Abbildung 34: Referenzbild Vulkanstein

Abbildung 35 zeigt den Unschärfegrad der einzelnen Bilder, $\sigma=0$ stellt das Referenzbild (Abbildung 32) dar. Mit steigendem σ nimmt der Grad der Unschärfe zu.

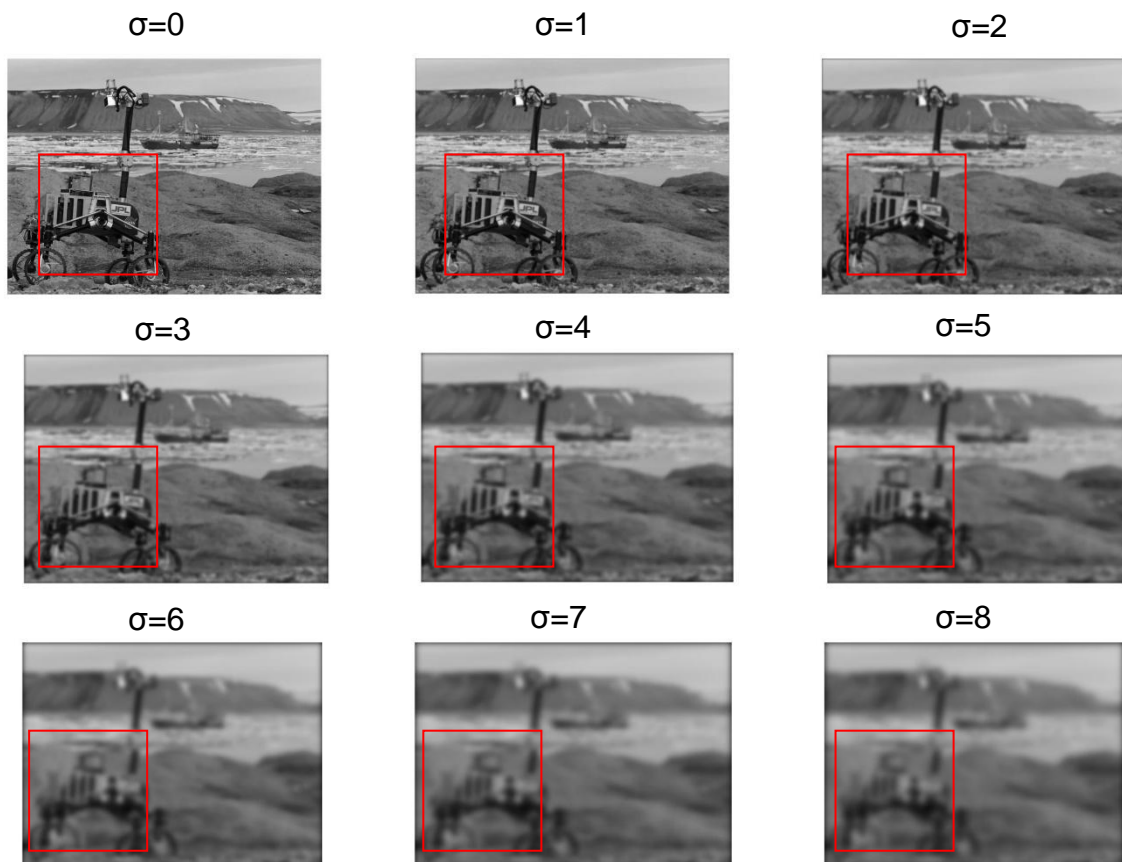




Abbildung 35: unterschiedlich scharf gezeichnete Bildversionen des Referenzbildes $\sigma=0$

In den folgenden Unterkapiteln sind die Schärfeverläufe der einzelnen Bilder $\sigma=0$ bis $\sigma=11$ dargestellt. Es wird ebenfalls der Einfluss von Rauschen, Über- und Unterbelichtung sowie die gewählte Größe des Fokussierfensters auf die Messergebnisse untersucht.

3.2.1 Ergebnisse der Matlab Simulation

In den folgenden Diagrammen (Abbildungen 36-38) sind die Ergebnisse der Matlab Simulationen nach dem in Abbildung 31 dargestellten Verfahren aufgetragen. Für diesen Testlauf wurden die Referenzbilder (Abbildungen 32-34) ohne die Addition eines zusätzlichen Rauschens und mit einer unveränderten Bildhelligkeit verwendet. Für das Rover Referenzbild (Abbildung 32) wird die in Abbildung 35 zu sehenden Bilderreihe verwendet. $\sigma=0$ stellt das Referenzbild dar. Mit steigendem σ nimmt der Grad der Unschärfe zu. Für jedes Testbild wird nun die Bildschärfe nach den in Kapitel 3.1 erläuterten Verfahren berechnet. Abbildung 36 zeigt die Ergebnisse des Rover Referenzbildes. Die Schärfewerte sind jeweils auf den höchsten vorkommenden Schärfewert normiert, um eine bessere Vergleichsmöglichkeit der einzelnen Methoden zuzulassen. Es ist deutlich zu erkennen, dass alle Methoden ein Maximum an der Stelle $\sigma=0$ besitzen. Da der Wert an der Stelle $\sigma=0$ den Wert für das scharfe Referenzbild darstellt, wird gezeigt, dass alle Verfahren Bildschärfe detektieren können. Der Verlauf der einzelnen Schärfefunktionen ist ebenfalls enorm wichtig, da anhand dieser Verläufe später die Fokussierung durchgeführt werden wird. Optimal ist hier ein Verlauf der ein Maximum an der Stelle des Bildes mit höchster Schärfe hat und in die Bereiche zunehmender Unschärfe kontinuierlich abfällt, so das bei einer Fokussierung eine Aussage getroffen werden kann in welcher Richtung sich das Maximum befindet. Brauchbare Verläufe liefern in Abbildung 36 vor allem die Tenengrad, Bayes DCT und SMD Methode. Die VdG Methode liefert sehr gute Ergebnisse in den Randbereichen mit großer Unschärfe, da die Steigung der Funktion in diesen Bereichen noch immer groß ist. Das Maximum ist bei der VdG Methode aber nicht so klar ausgeprägt. Die Laplace- und EdB-Methoden zeigen schlechtere Verläufe, da das Maximum zwar sehr klar zu erkennen ist, aber die Funktion in den Randbereichen mit großer Unschärfe zu flach abfällt und fast eine Steigung von 0 erreicht.

In den Abbildungen 37 und 38 sind die Verläufe der einzelnen Schärfemethoden der beiden anderen Referenzbilder (Abbildungen 33 und 34) analog aufgetragen. Die Ergebnisse der Matlab-Simulationen des Mars-Panorama und des Stein-Referenzbildes sind denen des Rover-Bildes sehr ähnlich und werden hier nicht weiter beschrieben. Sie sind im Anhang A abgebildet.

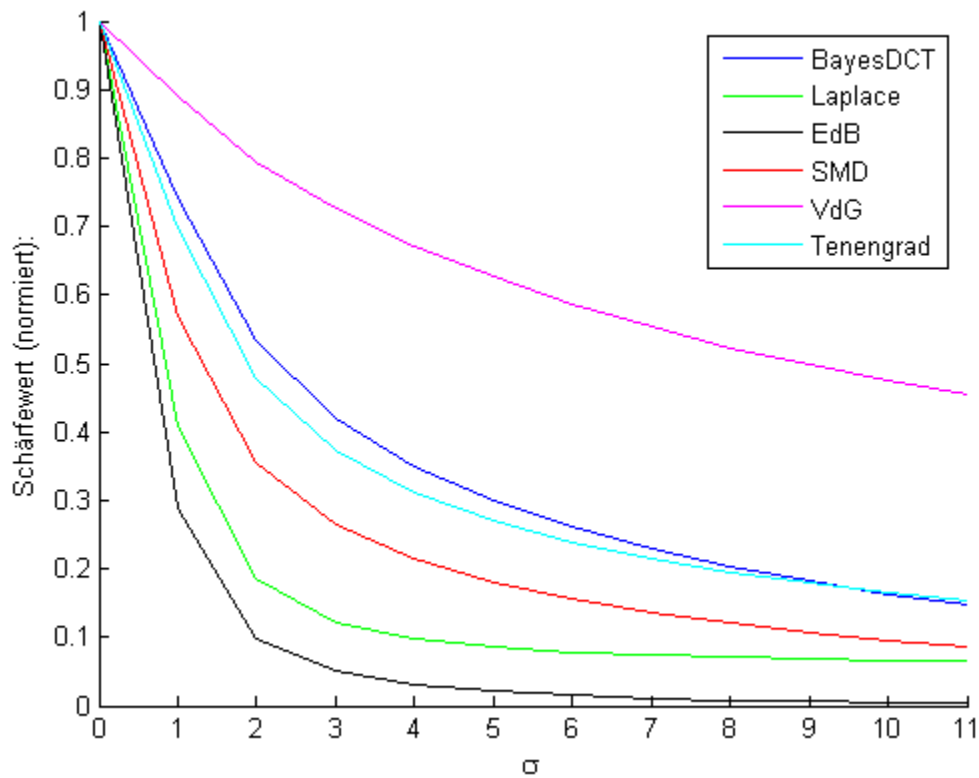


Abbildung 36: Schärfekurven der Testbildreihe des Referenzbildes Rover

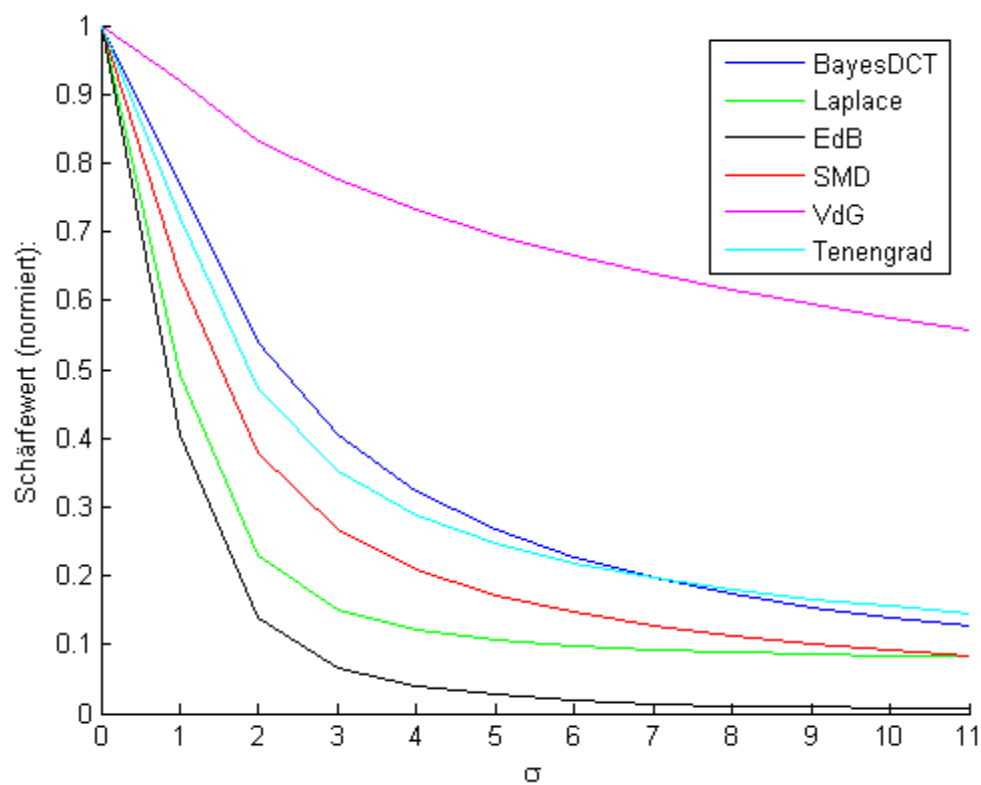


Abbildung 37: Schärfekurven der Testbildreihe des Referenzbild Mars

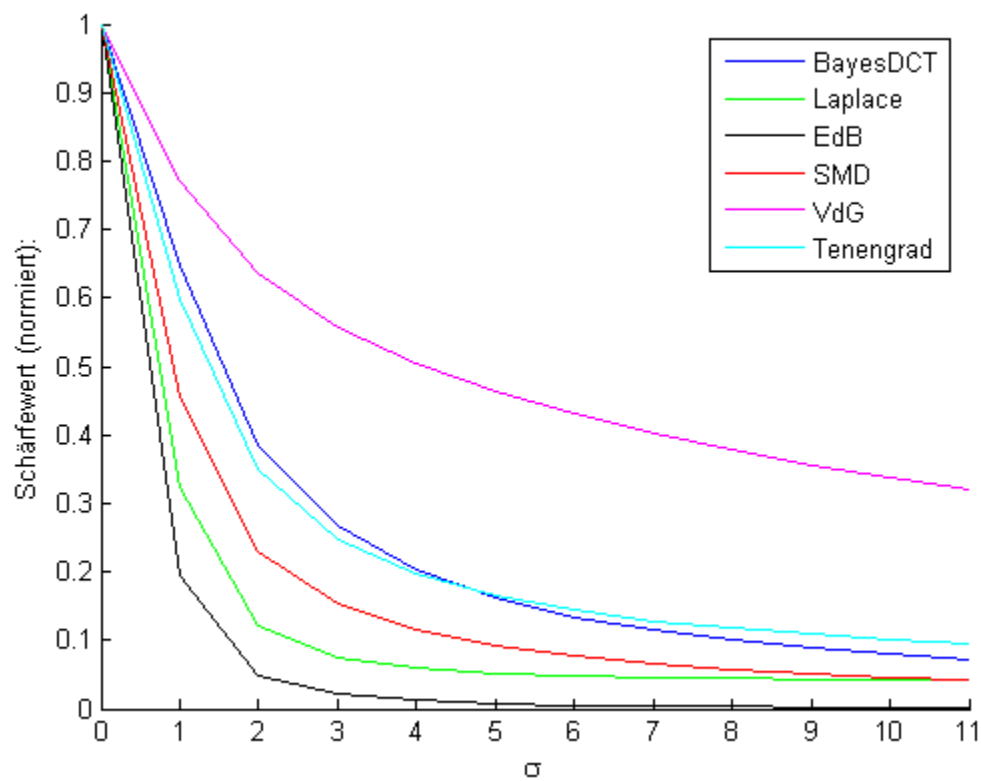


Abbildung 38: Schärfekurven der Testbildreihe des Referenzbildes Stein

3.2.2 Einfluss der Fokussierfenstergröße

Der Einfluss der Fokussierfenstergröße auf die Ermittlung der Schärfe ist in den folgenden Diagrammen in diesem Teilkapitel aufgetragen. Zu diesen Tests werden verschiedenen Fokussierfenstergrößen zur Schärfestimmung benutzt [vgl. Abbildung 26]. Die Fenstergröße und Position ist frei wählbar, damit einzelne Teilbereiche der Fotos genau untersucht werden können. Eine optimale Schärfe und Bildbelichtung wird immer für die Inhalte der Teilfenster gewonnen. Je größer das Teilbild gewählt wird, desto mehr Rechenleistung ist notwendig, um die Bildschärfe zu berechnen. Ist das Ziel ein Panorama Bild aufzunehmen, so wird das Fokussierfenster auf den gesamten pancromatischen Teil des Bildes positioniert. Die so ermittelte Schärfe ist die Gesamtschärfe des Bildes. Bei einem maximalen Schärfewert ist dementsprechend das Gesamtbild maximal scharf.

Wie in den Abbildungen 39-43 zu sehen ist, zeigen die Verläufe der Schärfefunktionen bei einer Fenstergröße von 400x400 Pixel bis 50x50 Pixel gute Ergebnisse. Die EdB- und Laplace-Methoden zeigen wie bereits beschrieben keine guten Verläufe in den unscharfen Bereichen. Die BayesDCT-Methode zeigt ebenfalls gute Verläufe für Fenstergrößen größer als 5x5Pixel. Die Schärfeverläufe dieser Methode flacht bei kleiner werdenden Fokussierfenstern weniger ab als die weiteren Methoden. Hierbei ist zu beachten, dass die BayesDCT Methode die Teilbilder in 8x8 Pixel große überlappungsfreie Teilbilder aufteilt. Werden Fokussierfenster benutzt die nicht durch 8 teilbar sind, so werden die fehlenden Werte durch 0 ersetzt.

Ab einer Fenstergröße von 10x10 Pixel flacht der Verlauf der Tenengrad Funktion ebenfalls stark ab (Abbildung 42). Für Fokussierfenster der Größe 5x5 Pixel und kleiner zeigen alle Verfahren keine brauchbaren Verläufe mehr (Abbildung 43).

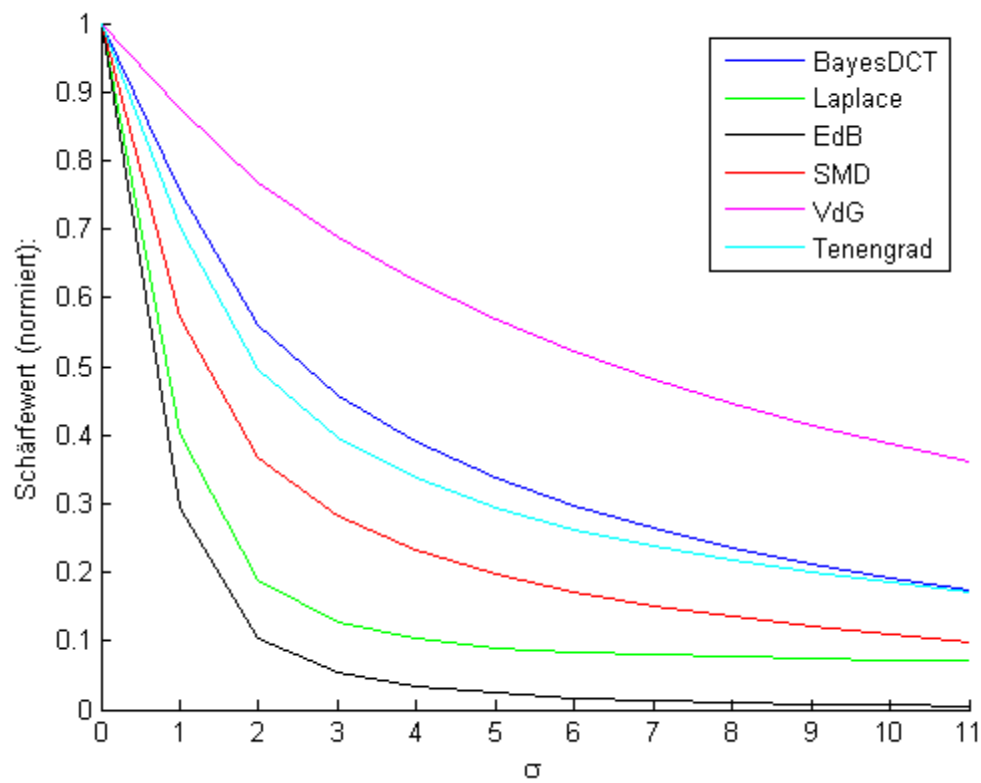


Abbildung 39: Schärfekurven der Rover Testbildreihe mit Fokussierfenstergröße 400x400 Pixel

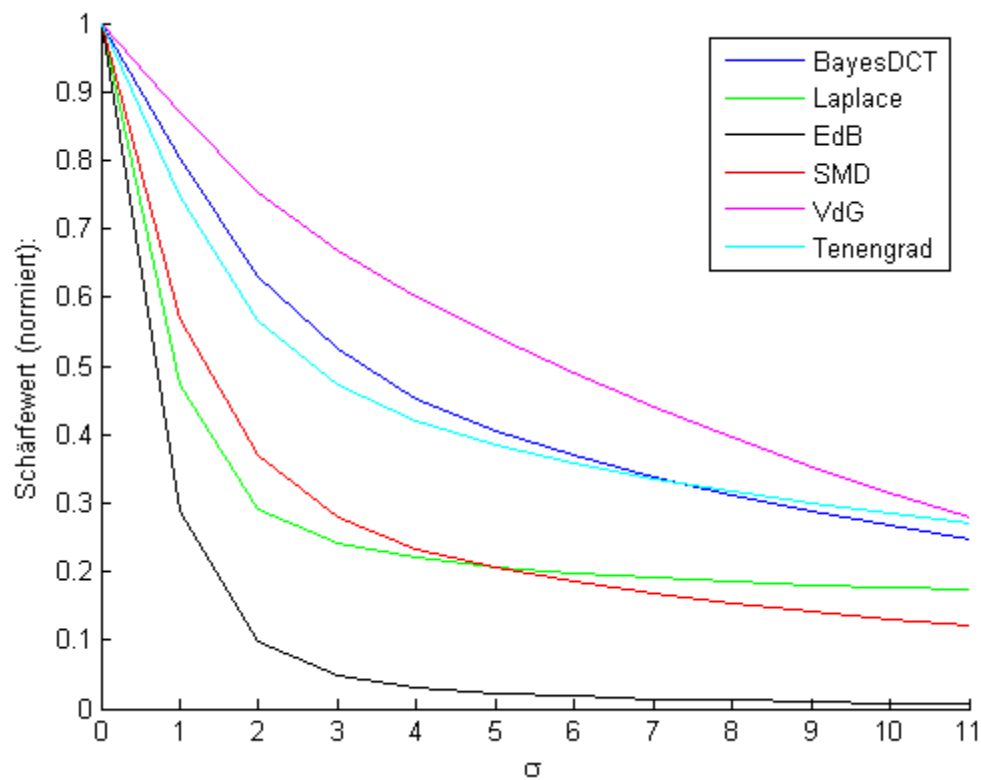


Abbildung 40: Schärfekurven der Rover Testbildreihe mit Fokussierfenstergröße 100x100 Pixel

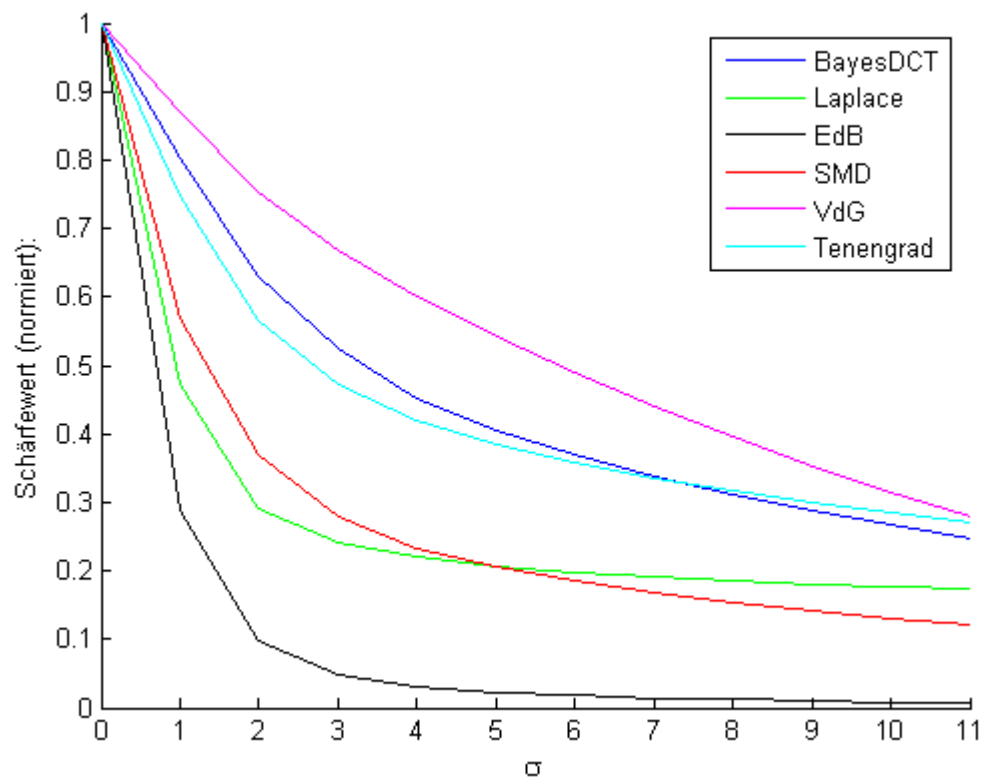


Abbildung 41: Schärfekurven der Rover Testbildreihe mit Fokussierfenstergröße 50x50 Pixel

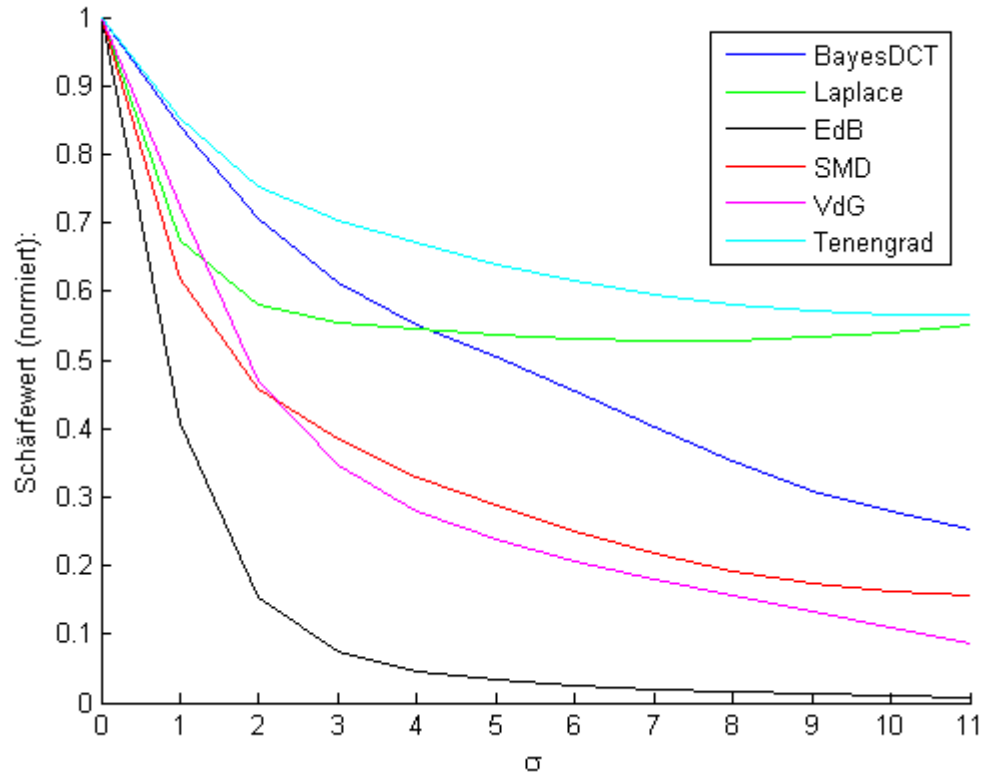


Abbildung 42: Schärfekurven der Rover Testbildreihe mit Fokussierfenstergröße 10x10 Pixel

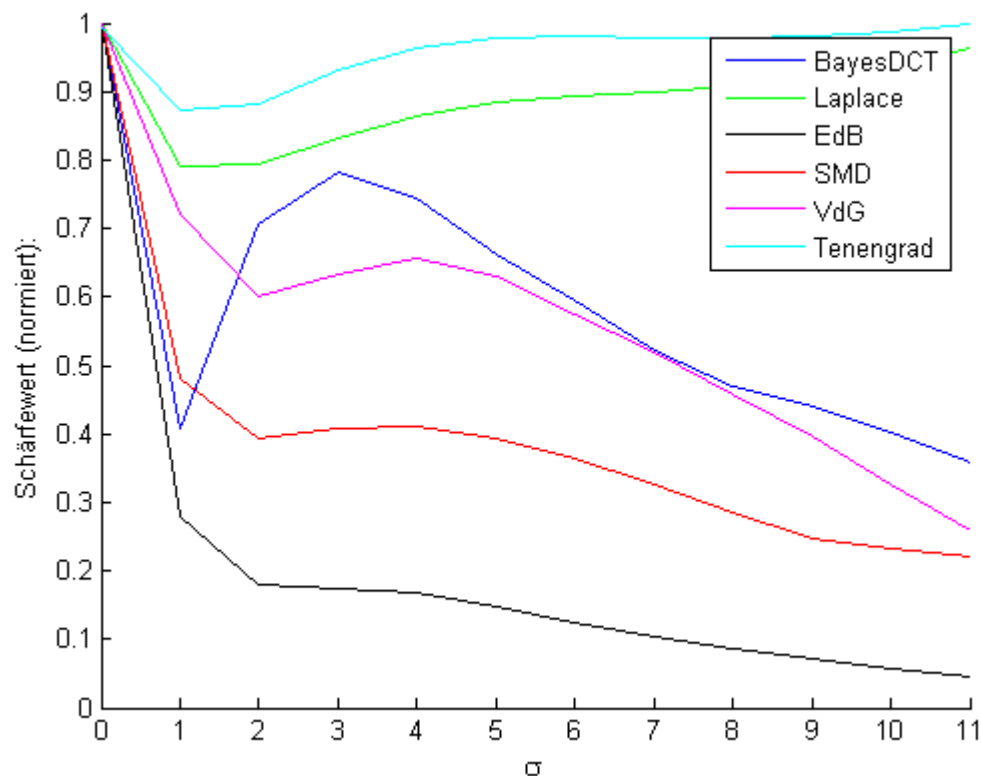


Abbildung 43: Schärfekurven der Rover Testbildreihe mit Fokussierfenstergröße 5x5 Pixel

3.2.3 Einfluss von Rauschen

Der Einfluss des auf das Referenzbild addierten Rauschens verschiedener Intensitäten wird in diesem Teilkapitel untersucht (vgl. Formel 29).

In Abbildungen 46-49 sind die Schärfekurven für verschiedene Rauschintensitäten r aufgezeigt. Für diese Tests wurde vor der Generierung der Bildreihe mit steigender Unschärfe (Abbildung 35) das Rauschen mit den jeweiligen Intensitäten r auf das Referenzbild addiert (vgl. Abbildung 31). Es ist zu erkennen, dass Rauschen mit der Intensität $r=0.01$ noch gute Schärfeverläufe zulässt (Abbildung 46). Bei steigenden Rauschintensitäten flachen die Schärfekurven ab. Die VdG- und Tenengrad-Methoden stellen sich als am robustesten gegen Rauschen dar. Diese beiden Methoden sind bei einer Intensität von $r=0.07$ noch einsetzbar (Abbildung 49).

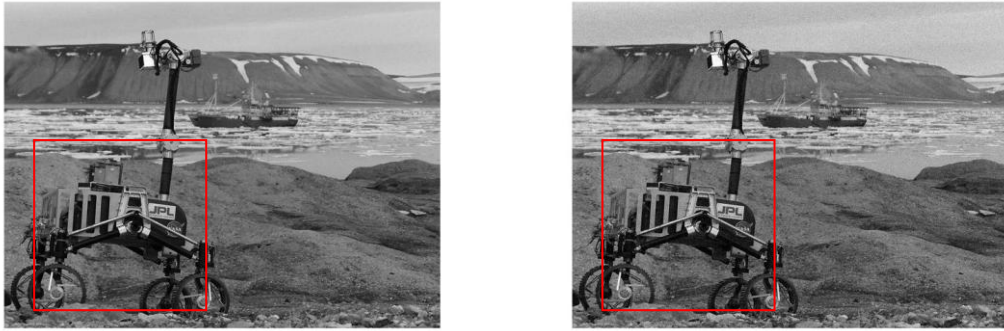


Abbildung 44: verrauschte Testbilder des Rovers , Rauschintensität $r=0.1$ (links) und $r=0.3$ (rechts)

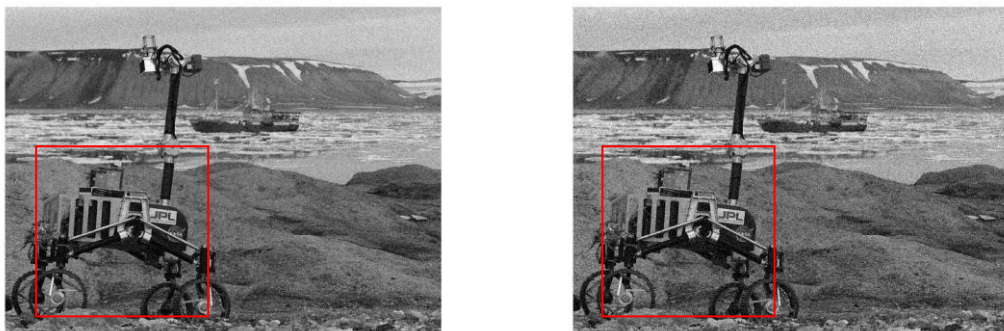


Abbildung 45: verrauschte Testbilder des Rover, Rauschintensität $r=0.5$ (links) und $r=0.7$ (rechts)

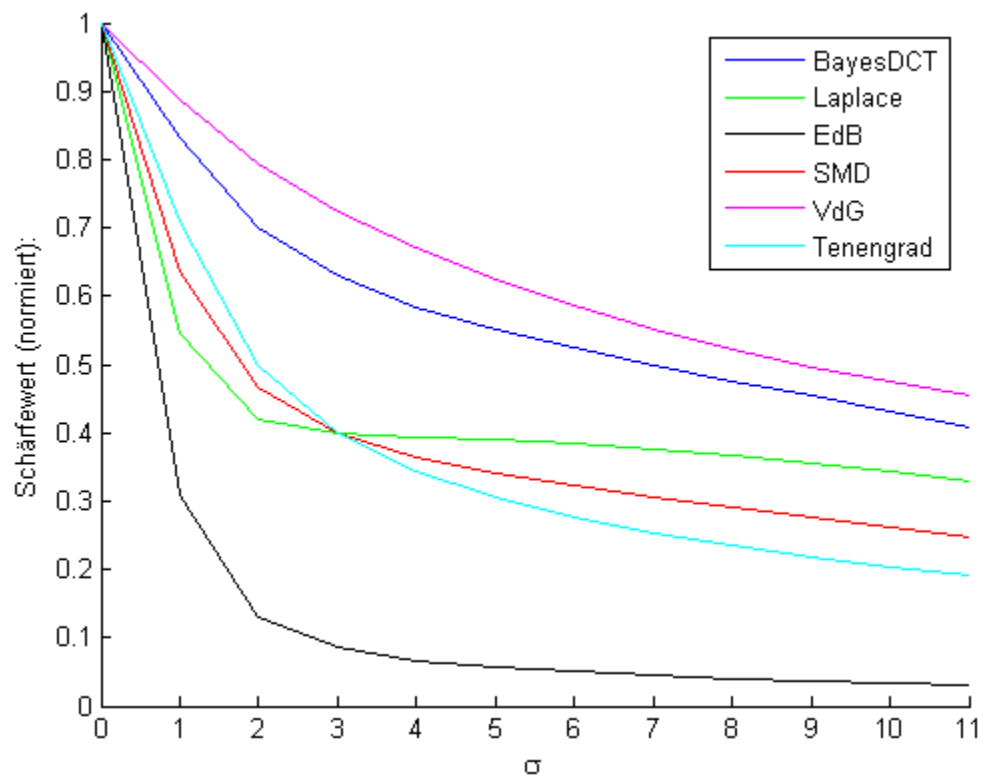


Abbildung 46: Schärfekurven der Rover Testbildreihe mit Rauschen der Intensität: $r=0.01$

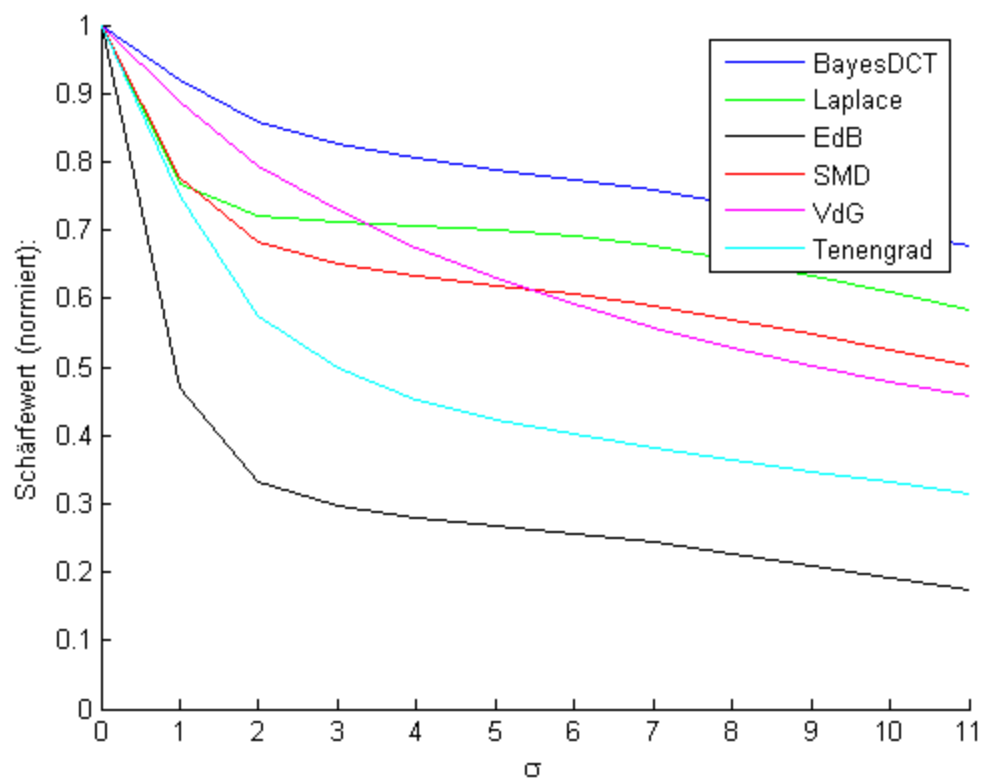


Abbildung 47: Schärfekurven der Rover Testbildreihe mit Rauschen der Intensität: $r=0.03$

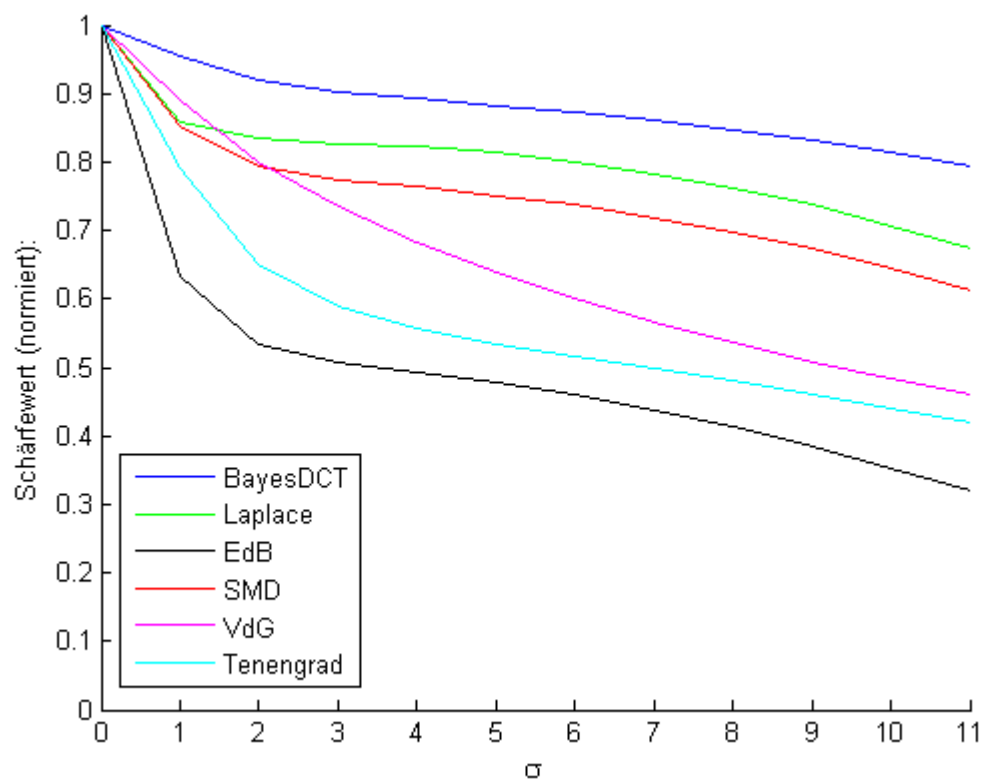


Abbildung 48: Schärfekurven der Rover Testbildreihe mit Rauschen der Intensität: $r=0.05$

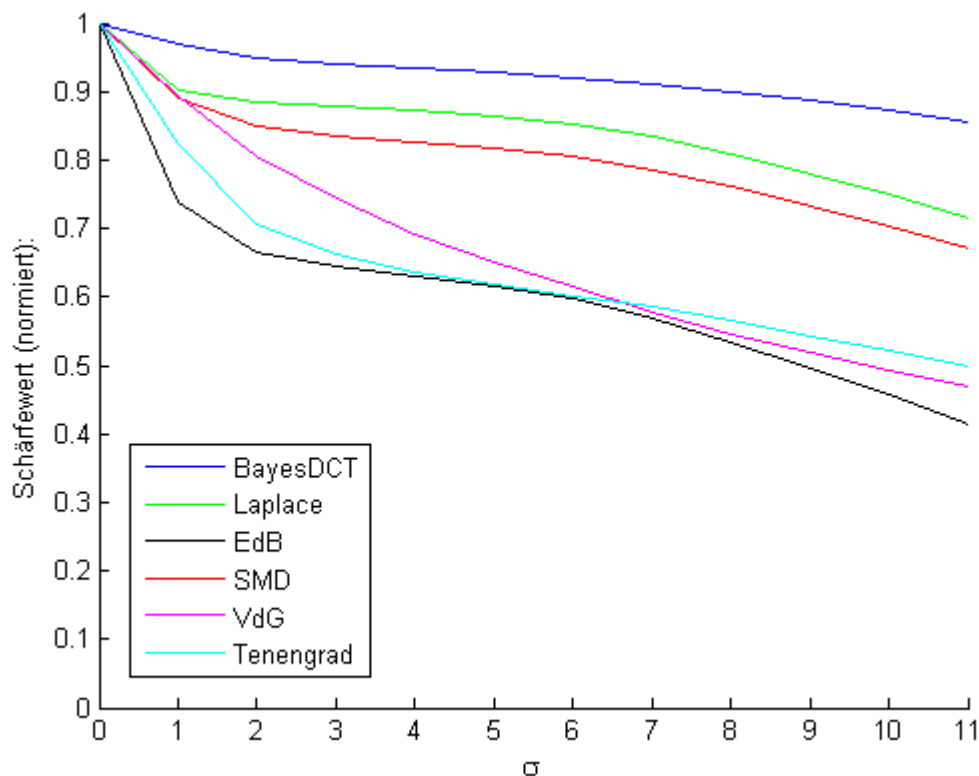


Abbildung 49: Schärfekurven der Rover Testbildreihe mit Rauschen der Intensität: $r=0.07$

3.2.4 Einfluss der Bildbelichtung

Für diese Tests wurden die Referenzbilder gemäß Abbildung 31 vor der Generierung der Unschärfebildreihe (Abbildung 35) mit den Faktor b multipliziert, um die Bildhelligkeit zu vergrößern ($b>1$) oder zu verringern ($b<1$). Die für die Tests benutzten Bilder sind in den Abbildungen 50 und 51 zu sehen. Für das unterbelichtete Bild (Abbildung 50) wurde der Faktor $b=0.1$ und für das überbelichtete Bild (Abbildung 51) $b=1.8$ gewählt. Mit diesen Werten soll demonstriert werden, wie die Auswirkungen stark unter- bzw. überbelichteter Bilder auf die Schärfekurven sind. Es sind aber keine Werte, die während der Mission zu erwarten. Hiermit soll überprüft werden, wie das Verhalten der Schärfekurven auf extreme Belichtungssituationen ist, um gegebenenfalls besser auf unerwartete Situationen reagieren zu können.

Die Funktionalität der Schärfefunktionen ist sowohl für das stark unterbelichtete als auch das stark überbelichtete Bilder gewährleistet. Wie in den Abbildungen 52 und 53 zu sehen ist, zeigen wieder nur die Laplace- und EdB-Methoden schlechte Randverläufe.

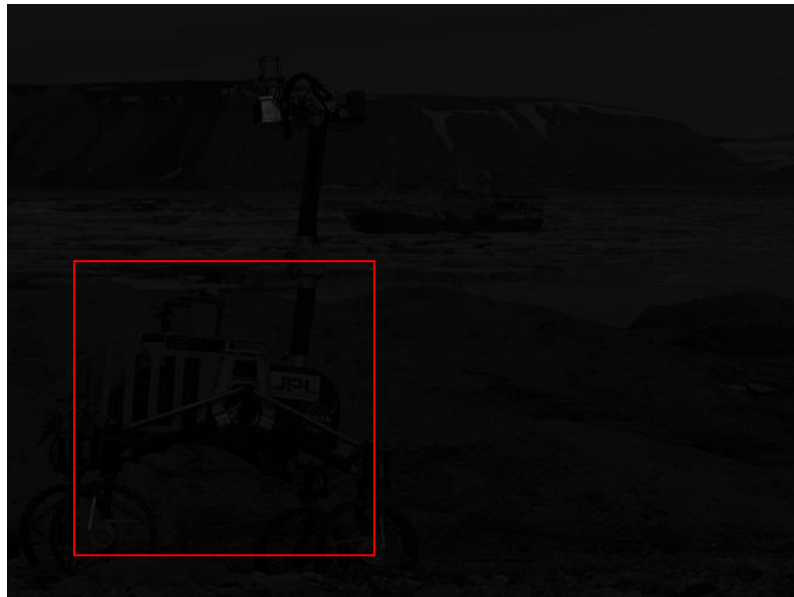


Abbildung 50: unterbelichtetes Bild des Rovers (Faktor $b=0.1$)

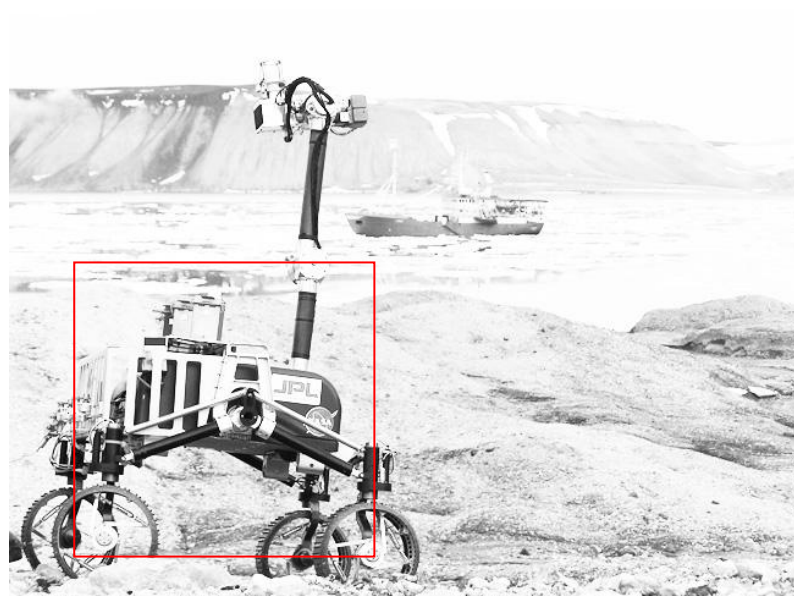


Abbildung 51: überbelichtetes Bild des Rovers (Faktor $b= 1.8$)

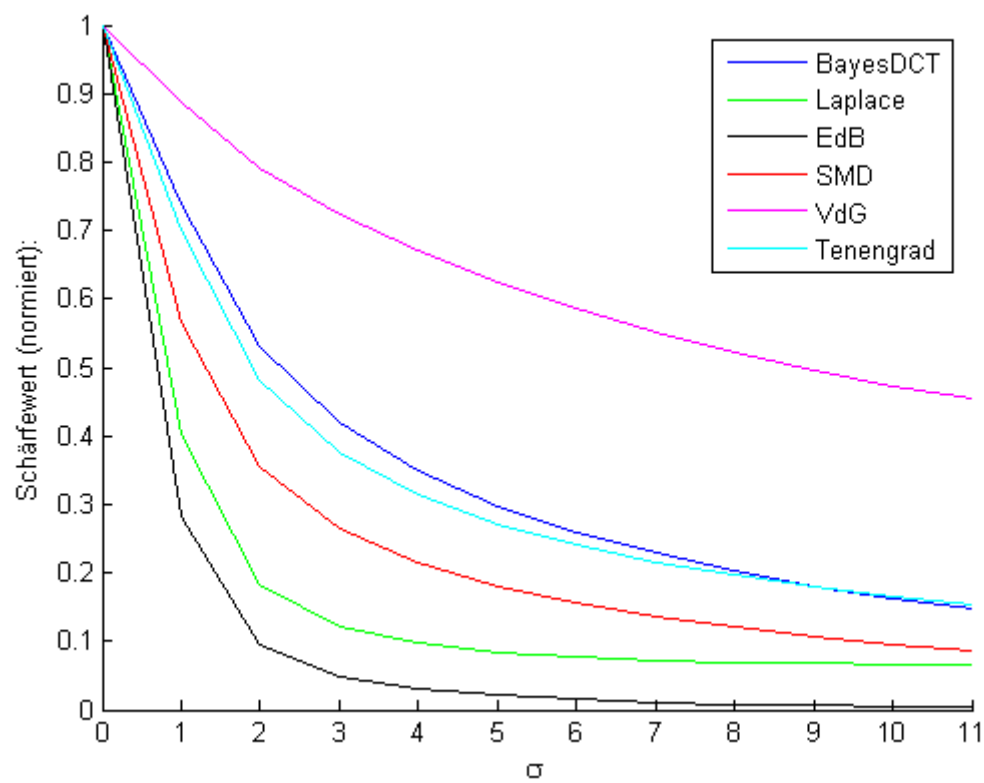


Abbildung 52: Schärfekurven der Rover Testbildreihe mit Belichtung $b=0.1$

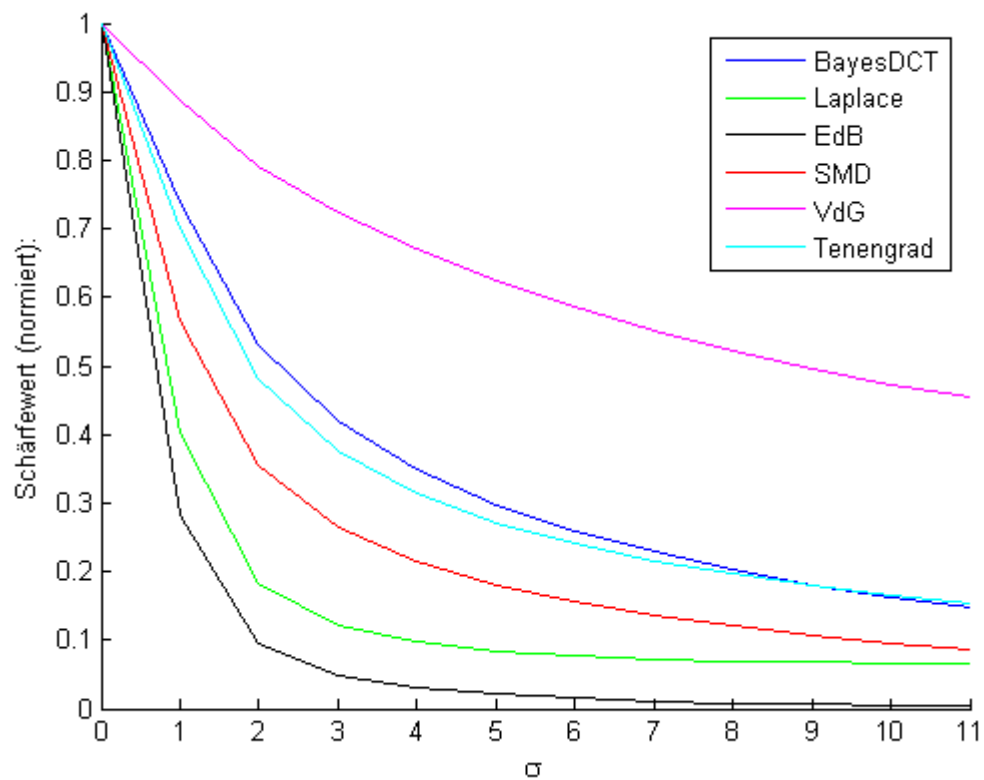


Abbildung 53: Schärfekurven der Rover Testbildreihe mit Belichtung $b=1.8$

3.2.5 Zusammenfassung und Auswertung der Untersuchungen mit Matlab

Die durchgeführten Matlab-Simulationen zeigen, dass alle Verfahren dazu geeignet sind, die Bildschärfe digitaler Bilder zu berechnen und anhand dieser Werte einzelne Bilder im Bezug auf die Bildschärfe miteinander zu vergleichen. Besonders gute Schärfeverläufe zeigen die Ergebnisse der Tenengrad-, BayesDCT sowie SMD-Verfahren. Sie haben ein gut ausgeprägtes Maximum an der Position der höchsten Bildschärfe und haben in den Bereichen einer geringen Bildschärfe immer noch eine erkennbare Steigung. Dieses Verhalten ist wichtig, da später anhand dieser Schärfeverläufe eine optimale Linsenposition während des Fokussiervorganges gefunden werden muss. Ist die Schärfekurve in den unscharfen Bereichen zu flach, wie es bei den Kurven der Laplace- und EdB-Methoden der Fall ist, ist es schwierig die richtige Fokussierrichtung zu erhalten, wenn zwei Bilder mit nur einem geringen Unterschied in der Linsenposition miteinander verglichen werden. Der Einfluss von Rauschen der Intensität 0.01 zeigt geringe Auswirkungen auf die Schärfekurven, sie flachen mit steigender Unschärfe etwas ab. Besonders stark von dieser Abflachung, die mit wachsendem Rauschen weiter zunimmt, sind die BayesDCT- und SMD-Verfahren betroffen. Die Tenengrad- und VdG-Verfahren zeigen trotz hohem Rauschen gute Verläufe. Alle Verfahren zeigen in ihren Verläufen geringe Auswirkungen auf Unter- oder Überbelichtung, dies liegt darin begründet, dass trotz geänderter mittlerer Bildhelligkeit trotzdem noch Kanten im Bild ausgeprägt sind. Dies ändert sich falls es zu starkem Informationsverlust bei der Unter- bzw Überbelichtung kommt. Der Einfluss der notwendigen Fokussierfenstergröße ist bei den einzelnen Verfahren aber unterschiedlich. Bei einer Größe von 50x50 Pixeln haben alle Schärfefunktionen unveränderte Verläufe. Bei einer Größe von 10x10 Pixel zeigen die Tenengrad- und Laplace-Verfahren eindeutige Schwächen und sind bei dieser Fokussierfenstergröße bereits nicht mehr benutzbar. Ab einer Größe von 5x5 Pixel und kleiner sind alle Schärfeverläufe nicht mehr aussagekräftig. Zusammenfassend wird gezeigt, dass die Tenengrad- und BayesDCT-Verfahren im Hinblick auf die im Kapitel 4 durchgeführten Suchverfahren am besten abschneiden. Ebenfalls gute Ergebnisse zeigen die relativ einfach zu realisierenden und wenig komplexen SMD- und VdG-Verfahren. Im nächsten Abschnitt werden die Matlab-Simulationen mit Versuchen anhand der richtigen HRC-Kamera überprüft.

3.3 Vergleich und Bewertung der Methoden zur Schärfebestimmung mit realen Messungen anhand der HRC-Kamera

Die beschriebenen Funktionen zur Bestimmung der Schärfe von digitalen Bildern werden in diesem Teilkapitel in C++ implementierter Form mit der in Kapitel 2 vorgestellten Version der HRC-Kamera getestet. Hierzu ist ein Versuchsaufbau entwickelt worden, der der realen Marsumgebung entspricht. Dieser Versuchsaufbau, die durchgeführten Tests und eine Testauswertung werden in den nachfolgenden

Teilkapiteln genauer beschrieben. Die Versuche testen die Methoden zur Schärfebestimmung hinsichtlich der Fokussierfenstergröße, additiven Rauschen und verschiedener Belichtungsintensitäten. Die Versuche sollen die im vorherigen Teilkapitel mit Matlab-Simulationen durchgeführten Tests verifizieren.

3.3.1 Versuchsaufbau

Die HRC-Kamera und Kamera-Software wird unter Laborbedingungen getestet. Der Testaufbau besteht aus Quarzsand und Vulkansteinen, die eine ähnliche Form und Struktur aufweisen, wie sie auf dem Mars erwartet werden. Über dimmbare Scheinwerfer kann die Beleuchtungsintensität eingestellt werden. Der gesamte Versuchsaufbau ist in Abbildung 54 zu sehen. Bedingt durch die Größe des Labors können Bilder bis zu einer Entfernung von 7m aufgenommen werden.



Abbildung 54: Testaufbau

3.3.2 Testdurchführung

In Abbildung 55 ist das Testtarget zu erkennen. Es handelt sich um einen Basalt-Vulkanstein, der den auf der Marsoberfläche vorkommenden Steinen ähnelt.



Abbildung 55: Testbild HRC-Versuche

Das Testtarget wird in verschiedenen Entfernungen mit einer identischen Fokussierfenstergröße von 100x100Pixel, einer Belichtungsintensität der Scheinwerfer von 1700Lux, sowie einer Kameraintegrationszeit von 43,068ms aufgenommen. Wie in Abbildung 56 zu sehen, startet der Testablauf an Motorposition 0 und geht bis zu einer Motorposition-Obergrenze von 7000 Schritten. Auf diesem Weg stoppt der Motor alle 25 Schritte und berechnet an dieser Position die aktuelle Bildschärfe innerhalb des Fokussierfensters. Die Messwerte werden in einer Datei gespeichert und können mit Matlab ausgewertet werden. Zusätzlich kann ein Rauschen auf das Bild addiert werden (vgl. Formel (29)).

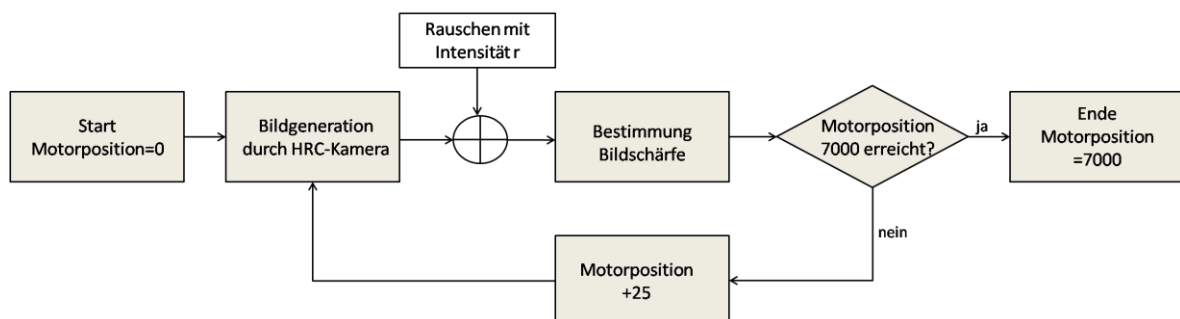


Abbildung 56: Blockdiagramm des Testablaufes

In Abbildung 57 sind die Verläufe der verschiedenen Schärfemethoden abgebildet. Die Matlab-Simulationen des letzten Kapitels bestätigen sich hier. Das Tenengrad Verfahren zeigt die besten Verläufe. Die Kurve hat ein stark ausgeprägtes Maximum und fällt bis in die Randbereiche sanft ab. Die SMD- und BayesDCT Verfahren zeigen ähnliche Verläufe, die ebenfalls eine gute Form haben, wobei das BayesDCT Verfahren leicht zackig verläuft. Das VdG-Verfahren hat ein nicht so stark ausgeprägtes Maximum, fällt aber fast linear in den Unschärfebereichen ab. Dies ist, wie bereits erwähnt, ein sehr gutes Verhalten, um später den Suchvorgang zu optimieren. Die Laplace- und EdB-Verfahren fallen nach dem stark ausgeprägten Maximum zu schnell ab und verlaufen in den Randbereichen, wie auch in den Matlab-Simulationen, zu flach. Hier muss aber angemerkt werden, dass der Fokussierbereich ab einer Motorposition von 5900 Schritten zu Ende ist. Deshalb kann der Motorbereich in den Schrittzahlbereich von 5900 bis 7000 Schritten vernachlässigt werden. Dies trifft auf die gesamten Messungen in diesem Kapitel zu.

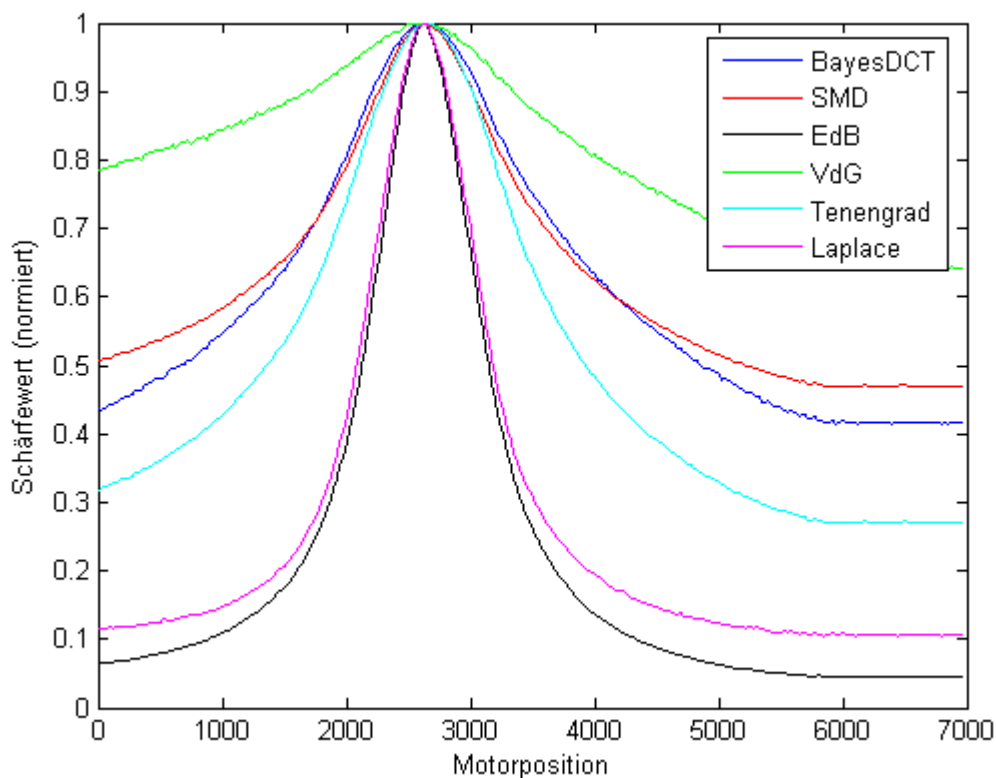


Abbildung 57: Schärfekurven eines Objektes in 6m Entfernung

3.3.3 Einfluss von Rauschen auf die Schärfekurven

Der Einfluss von normalverteilten Rauschen mit einer Varianz $\sigma_{\text{Noise}}^2=1$, einer Standardabweichung $\sigma_{\text{Noise}}=1$ sowie einem Mittelwert von 0, das mit einer Intensität r auf die einzelnen Pixelwerte addiert wird (vgl. Formel (29)), ist in den Abbildungen 58-60 zu erkennen. Besonders schlecht ist der Verlauf des Laplace-Verfahrens. Die weiteren Methoden, zeigen bis auf nicht mehr so glatte Verläufe, geringere

Auswirkungen. Mit steigendem Rauschen steigt auch die Welligkeit der einzelnen Schärfeverläufe. Sehr robust gegen Rauschen in den realen Tests sind, identisch mit den Simulationen, das Tenengrad- und VdG-Verfahren, bei diesen weisen die Verläufe trotz starkem Rauschens ein gut erkennbares Maximum und einen guten Verlauf in die Randbereiche auf. Bei dieser Rauschintensität sind die anderen Verfahren alle unbrauchbar.

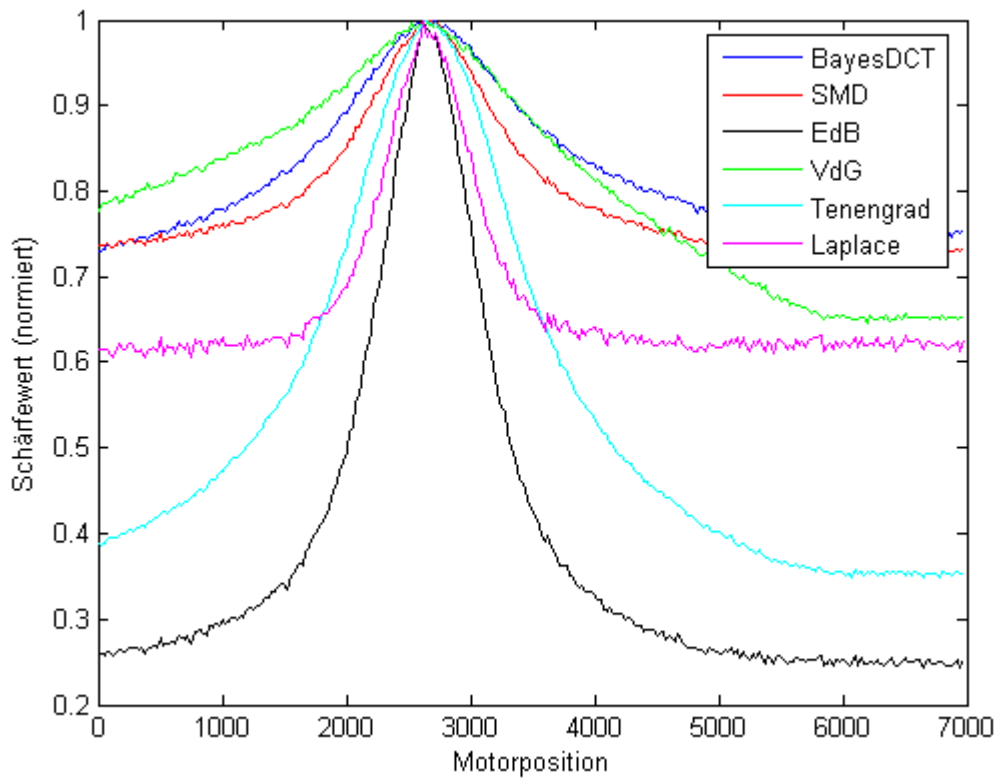


Abbildung 58: Schärfekurven eines Objektes in 6m Entfernung mit Rauschintensität $b=0.03$

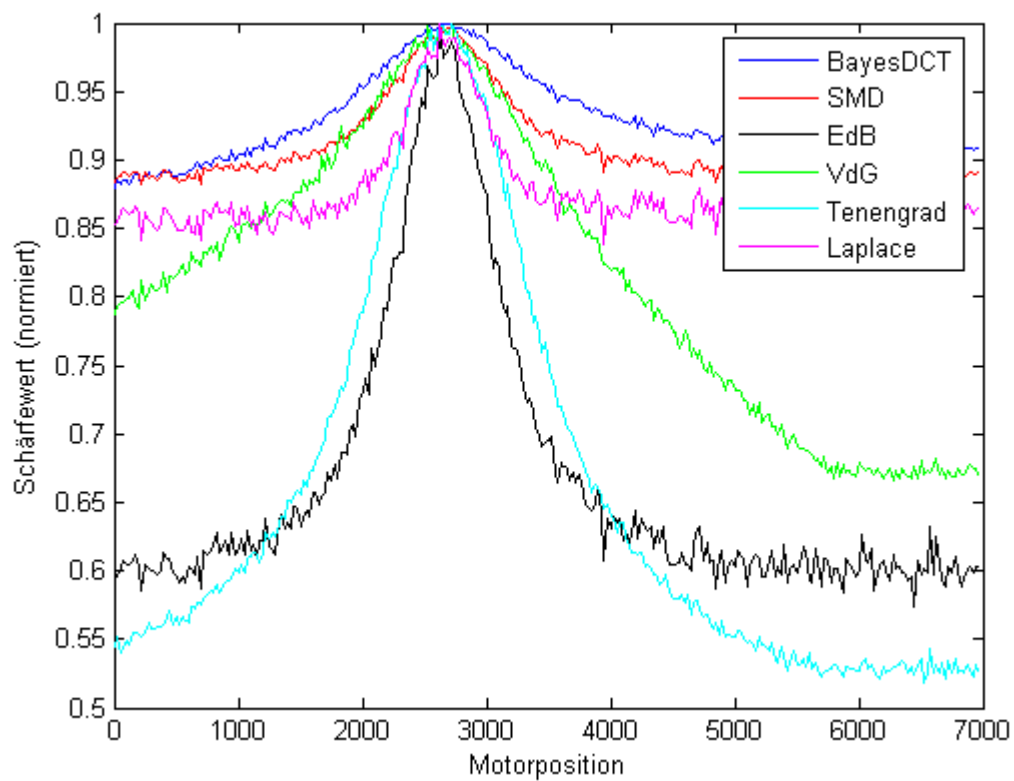


Abbildung 59: Schärfekurven eines Objektes in 6m Entfernung mit Rauschintensität $b=0.06$

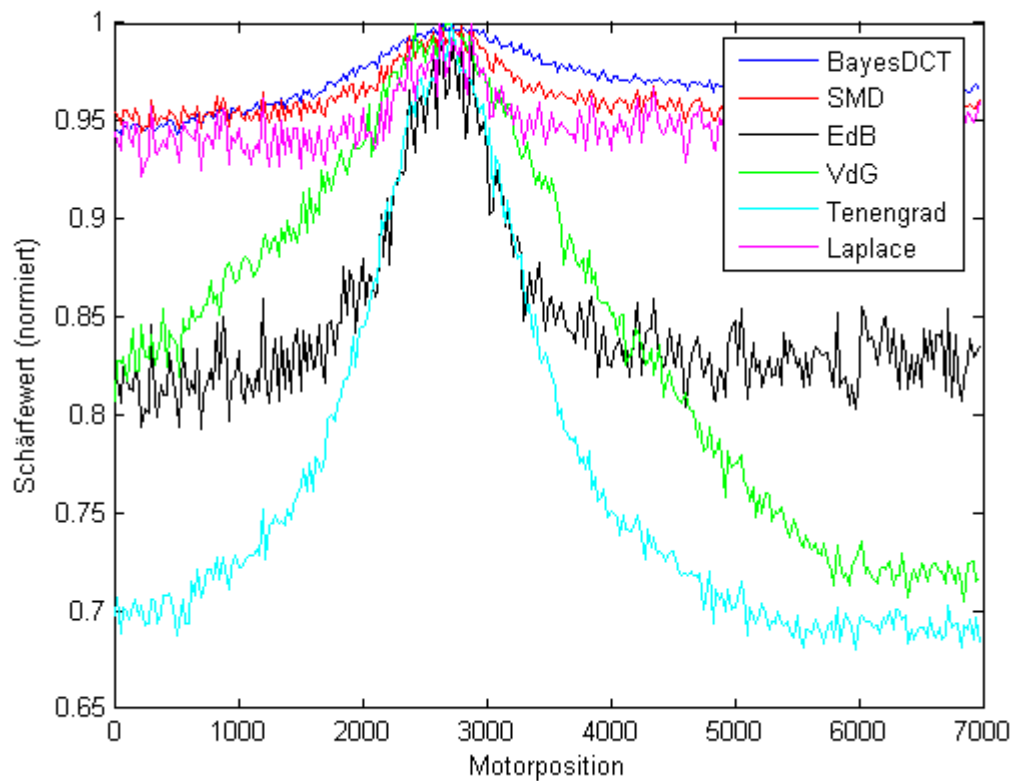


Abbildung 60: Schärfekurven eines Objektes in 6m Entfernung mit Rauschintensität $b=0.09$

3.3.4 Einfluss der Bildbelichtung auf die Schärfekurven

Um den Einfluss der Belichtungsqualität der im Fokussierfenster abgebildeten Teilbilder zu bestimmen, wird in diesem Kapitel die Ausleuchtungsstärke des Versuchsaufbaus variiert. Dies ist durch die eingesetzten dimmbaren Scheinwerfersysteme möglich. Die Integrationszeit der HRC-Kamera wird in allen Versuchsreihen nicht verändert, um schlechte Bildqualitäten zu gewährleisten. In Abbildung 61 ist die Beleuchtungsstärke am Zielobjekt mit 50Lux sehr gering. Die resultierenden Schärfeverläufe (Abbildung 62) zeigen eine starke Welligkeit, die besonders in den Randbereichen stärker wird. Die Tenengrad- sowie VdG-Verfahren haben zwar auch eine stark ausgeprägte Welligkeit, die Verläufe fallen in unscharfen Bereichen aber trotzdem ab. Mit steigender Bildausleuchtung von 600 bzw. 6000Lux (Abbildungen 63 und 65) fällt die Welligkeit geringer aus (Abbildungen 64 und 66). Dies ist im Bezug auf die Fokussierung eine wichtige Erkenntnis. Es sollte deshalb vermieden werden eine Fokussierung bei geringer Bildausleuchtung ohne Anpassung der Kameraintegrationszeit durchzuführen.



Abbildung 61: Testbild Beleuchtungsstärke 50Lux mit Fokussierfenster

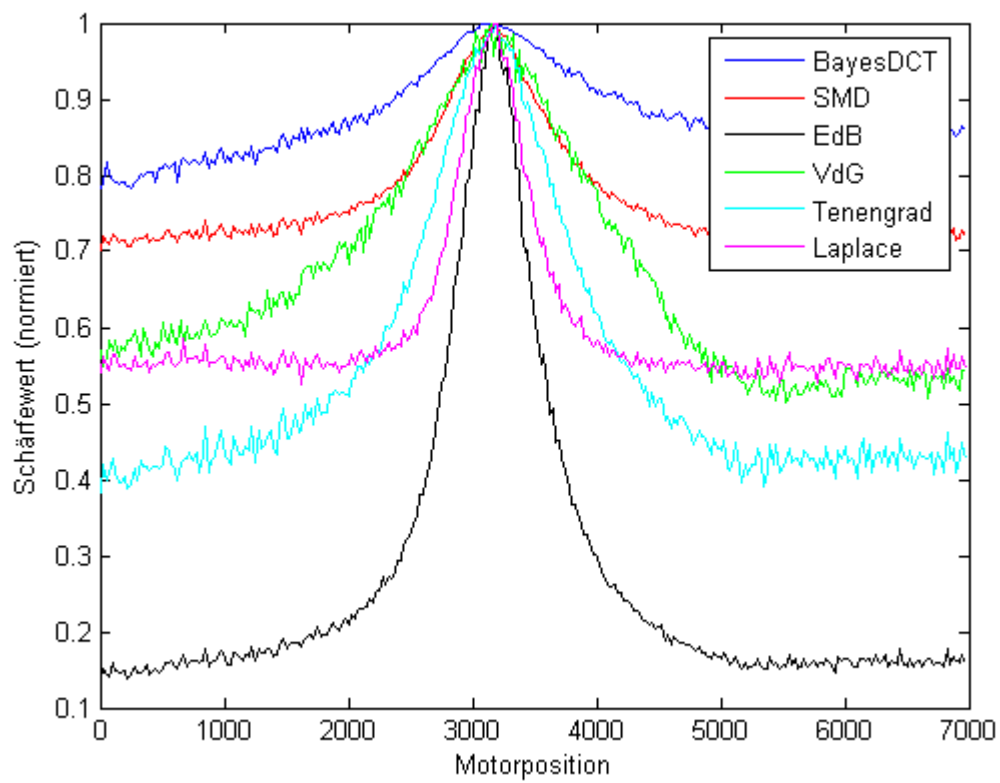


Abbildung 62: Schärfekurven eines Objektes in 5m Entfernung (50 Lux)



Abbildung 63: Testbild Beleuchtungsstärke 600 Lux mit Fokussierfenster

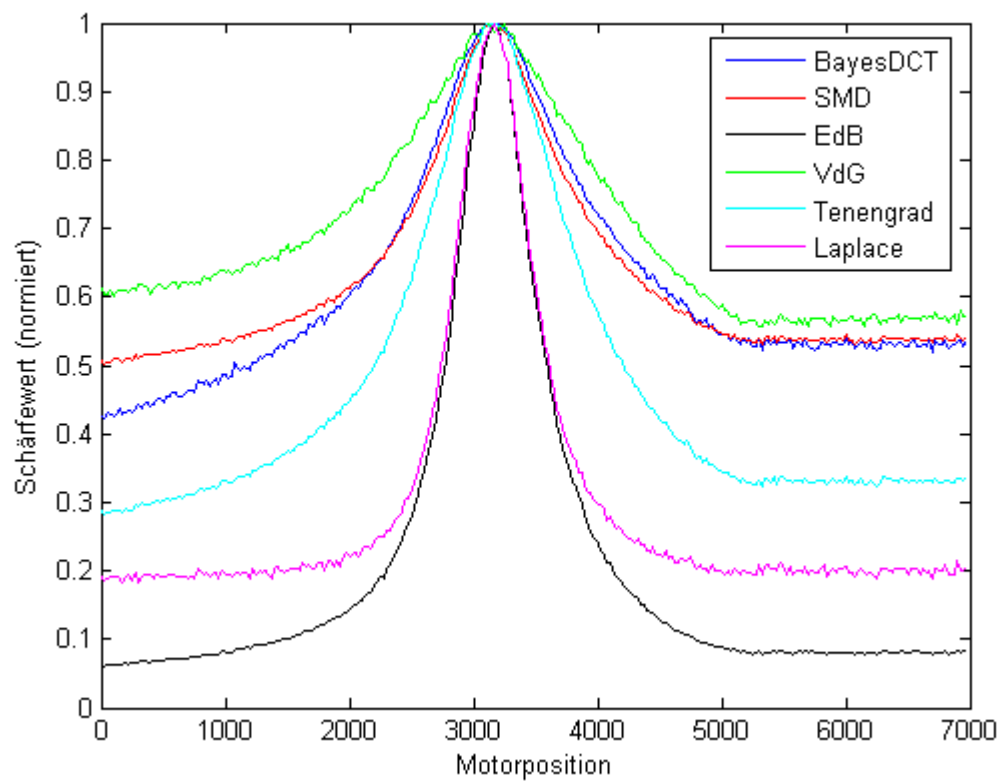


Abbildung 64: Schärfekurven eines Objektes in 5m Entfernung (600 Lux)



Abbildung 65: Testbild Beleuchtungsstärke 6000 Lux mit Fokussierfenster

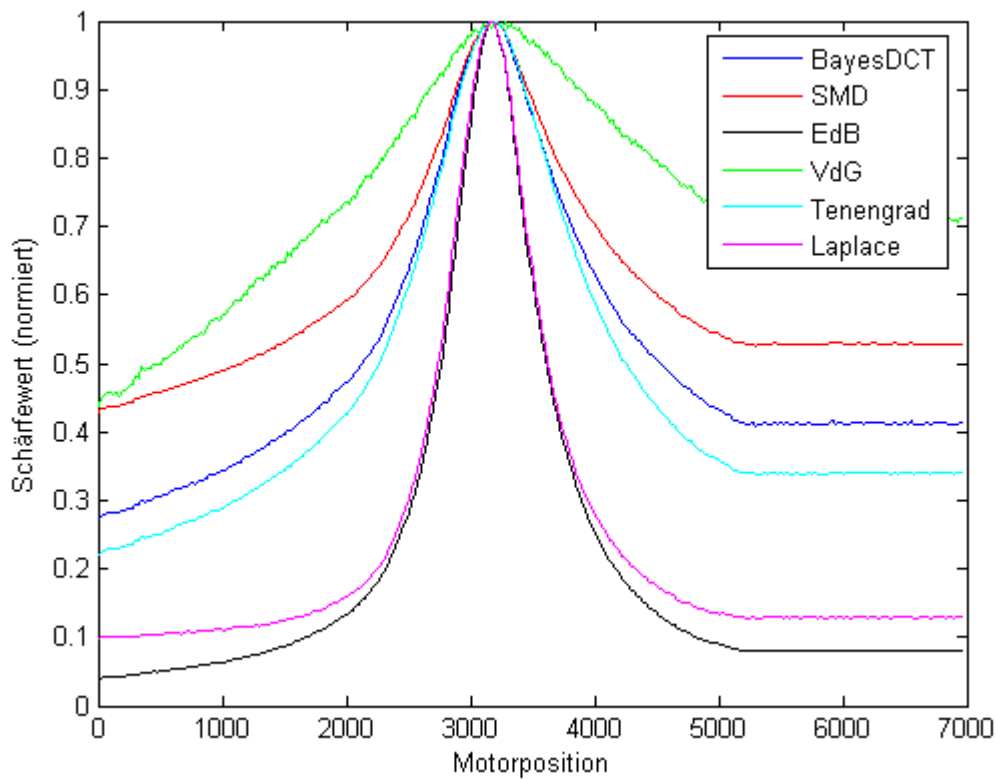


Abbildung 66: Schärfekurven eines Objektes in 5m Entfernung (6000 Lux)

Da in der Realität nicht gewährleistet sein werden, dass die Bildbelichtung über die gesamte Fokussierdauer konstant ist, werden in den Abbildungen 67-72 der Einfluss der Bildausleuchtung auf die Absolutwerte der einzelnen Schärfekurven untersucht. Es ist deutlich erkennbar, dass die Schärfewerte stark von der Beleuchtungsintensität abhängig sind. Besonders stark ist die Auswirkung einer veränderten Beleuchtungsintensität auf des VdG- und EdB-Verfahren. Vergleichsweise gering sind die Auswirkungen auf das BayesDCT-Verfahren.

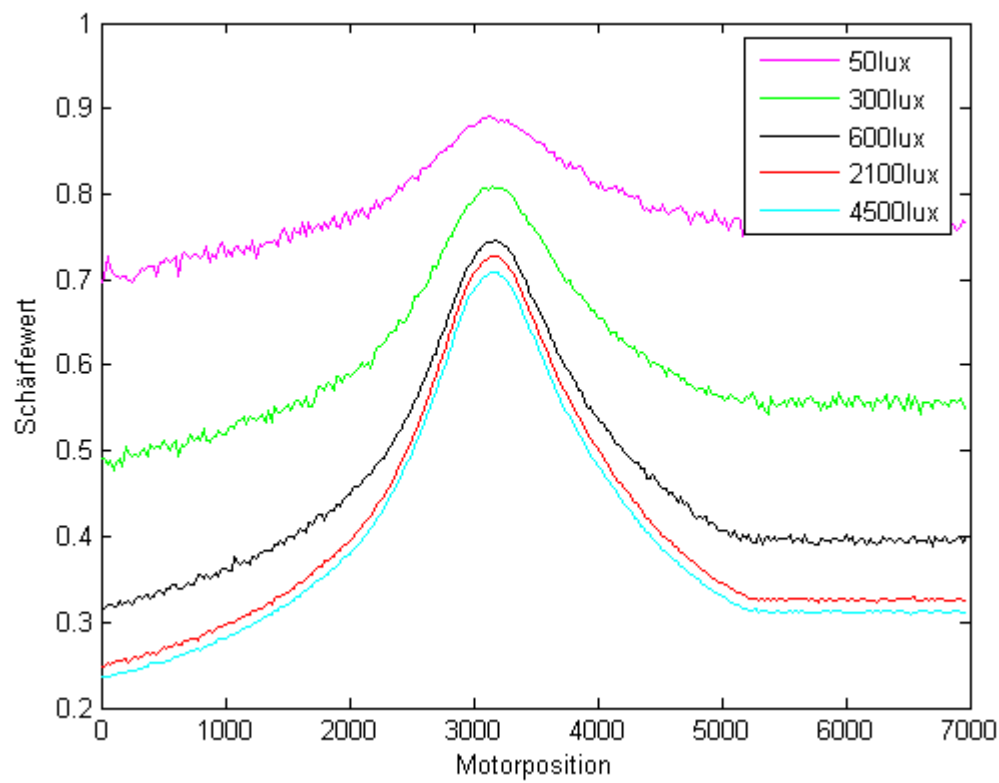


Abbildung 67: BayesDCT Schärfekurven bei verschiedenen Belichtungsintensitäten

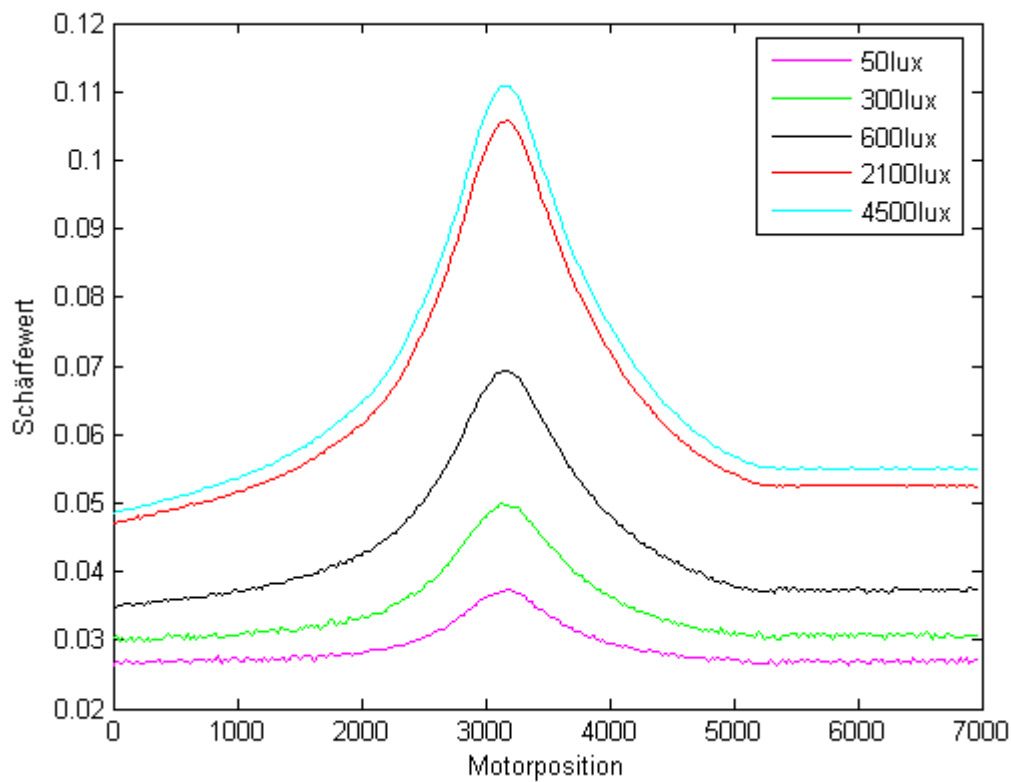


Abbildung 68: SMD Schärfekurven bei verschiedenen Belichtungsintensitäten

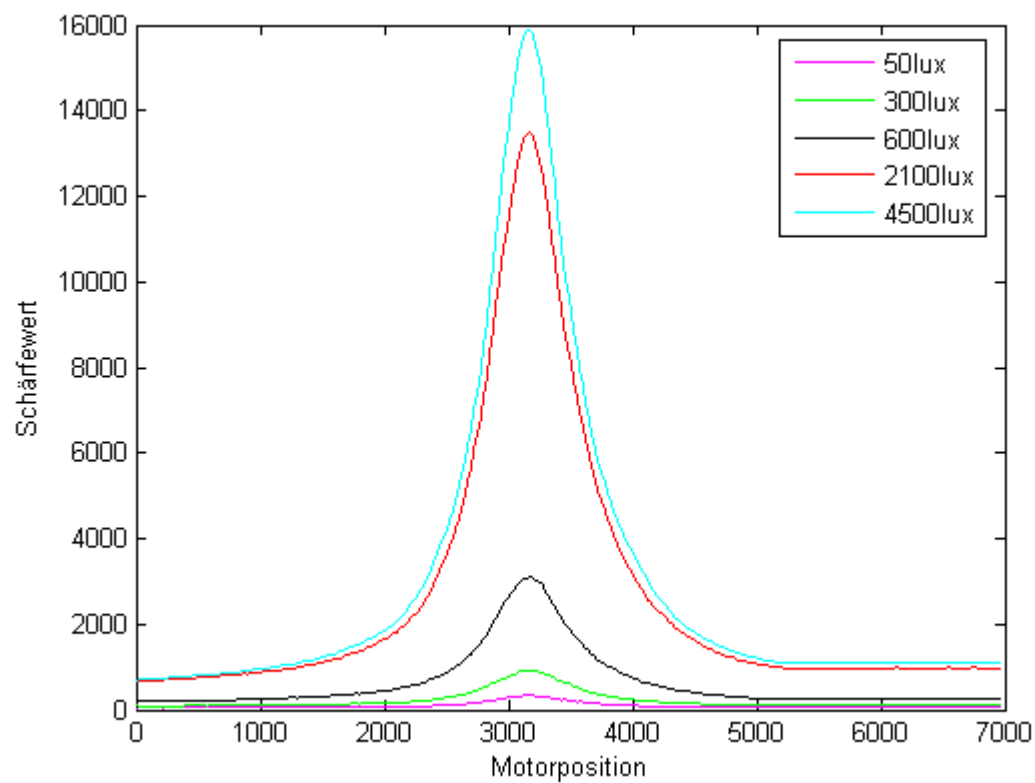


Abbildung 69: EdB Schärfekurven bei verschiedenen Belichtungsintensitäten

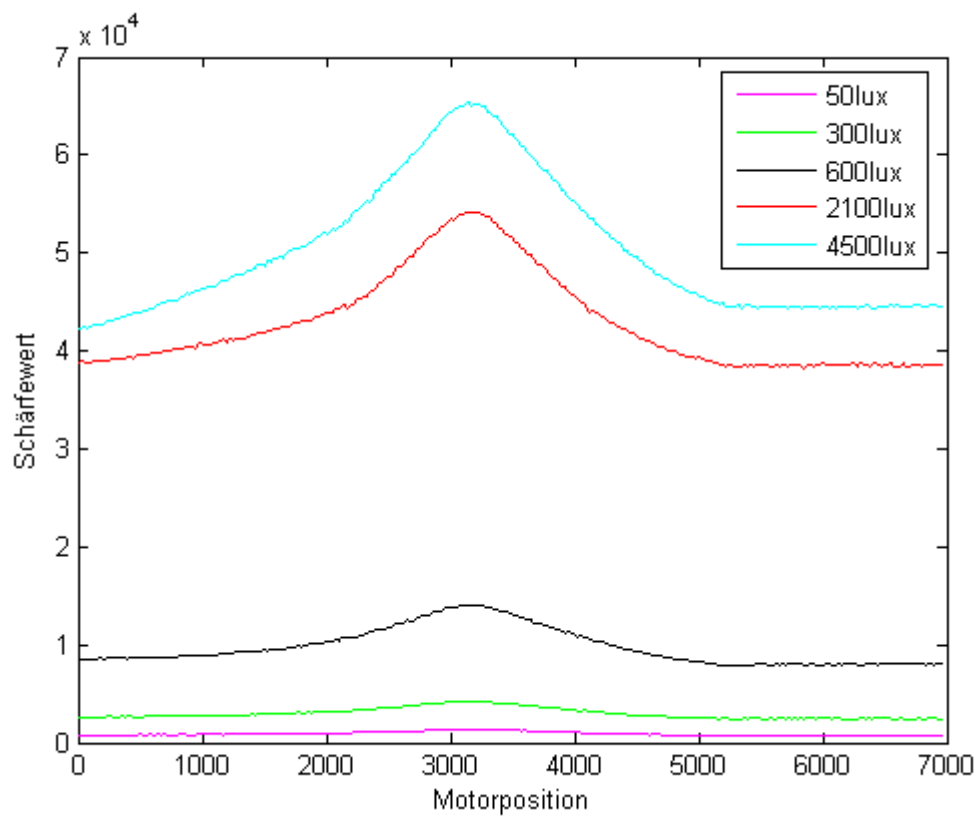


Abbildung 70: VdG Schärfekurven bei verschiedenen Belichtungsintensitäten

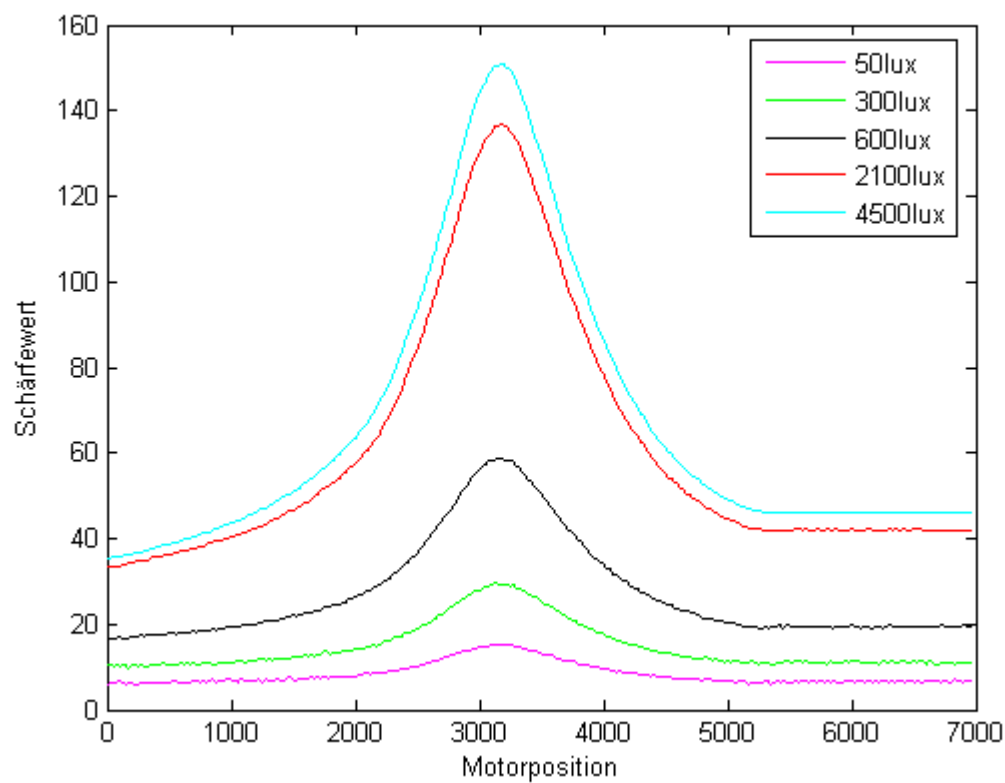


Abbildung 71: Tenengrad Schärfekurven bei verschiedenen Belichtungsintensitäten

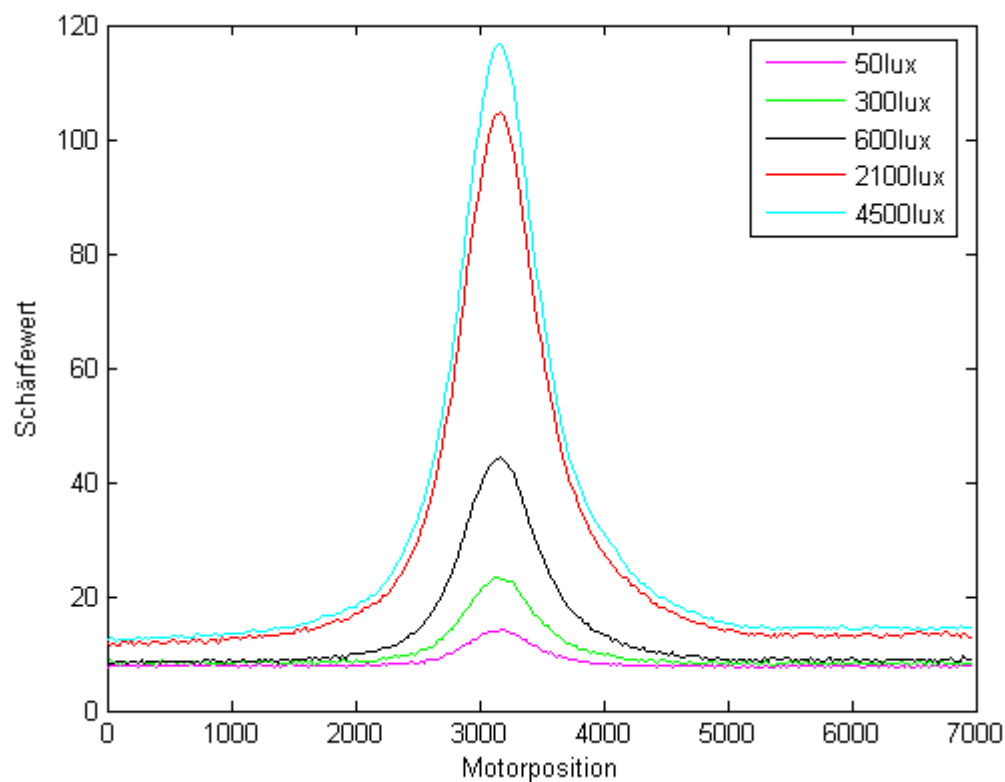


Abbildung 72: Laplace Schärfekurven bei verschiedenen Belichtungsintensitäten

Auf der Erde kann es an einem wolkigen Tag zu sehr schnellen Lichtintensitätsschwankungen des Sonnenlichts kommen. Dies hätte, bedingt durch die starke Abhängigkeit der Lichtintensität auf die Schärfewerte, negative Auswirkungen auf den Fokussiervorgang. Auf dem Mars wird dieser Störeinfluss geringer ausfallen, da in der Marsatmosphäre nur vereinzelte und lichtdurchlässigere Wolken vorkommen. Um einen Fokussiervorgang robust gegen Schwankungen der Lichtintensität zu machen, muss die durchschnittliche Bildhelligkeit (vgl. Kapitel 3.4) durch Anpassung der Belichtungszeit während des Fokussiervorgangs der Kamera konstant gehalten werden.

3.3.5 Einfluss der Fokussierfenstergröße auf die Schärfekurven

Um das Verhalten der Schärfefunktionen auf verschiedene Fokussierfenstergrößen zu erhalten, werden bei gleichbleibenden Lichtverhältnissen und Kamerastellungen, verschiedene Größen des Fokussierfensters benutzt. Tests werden mit den Größen 10x10, 50x50, 100x100, 200x200 Pixeln durchgeführt, die in Abbildung 73 zu sehen sind. In den Abbildungen 74-77 sind die Ergebnisse dargestellt. Auffällig ist, dass bei einer Fenstergröße von 10x10Pixel (Abbildung 74) die Schärfefunktionen eine starke Welligkeit in den Randbereichen aufweisen. Diese verringert sich mit steigender Fenstergröße. Bei einer Fenstergröße von 200x200Pixeln, die größer als das Zieltarget ist (Abbildung 77), flachen die Schärfekurven in den Randbereichen stark ab. Die VdG-Methode fällt bei dieser Fenstergröße komplett aus und zeigt kein Maximum an der Stelle mit der besten Bildqualität. Dies liegt darin Begründet, dass die VdG-Methode keine Kanten detektiert sondern nur eine statistische Methode ist (vgl. Formeln (19 und 20)). In diesem Fall besteht das Fokussierfenster aus einem hellen Hintergrund auf dem das dunkle Zieltarget liegt. In Folge dessen kommt es bei der Varianzberechnung zu Fehlinformationen.

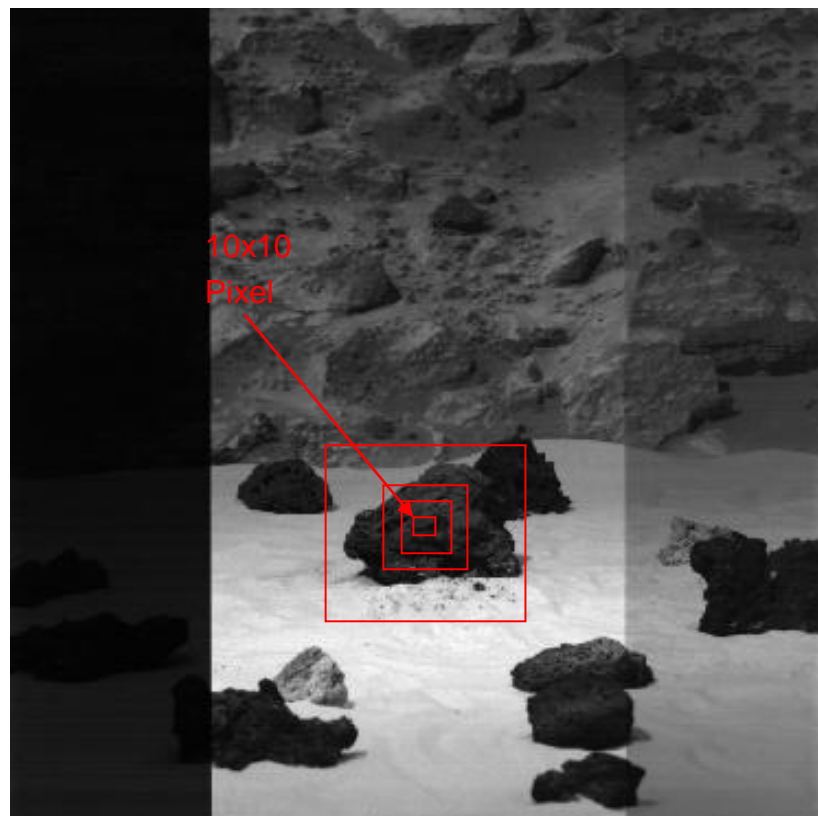


Abbildung 73: Verschiedene Fenstergrößen für Tests

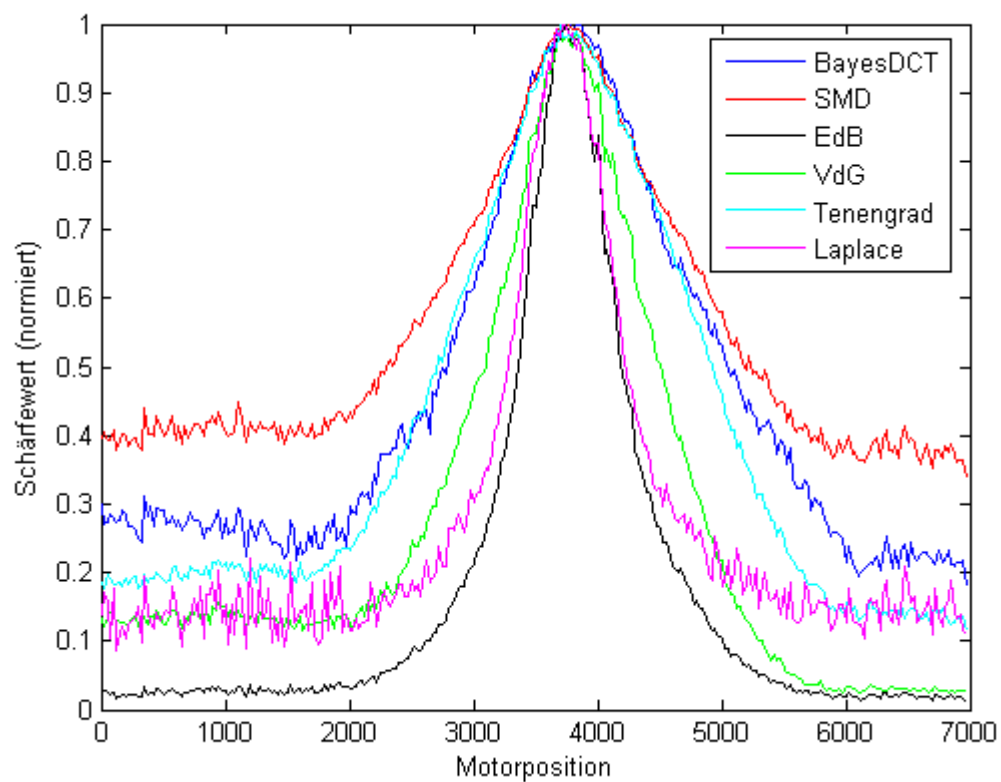


Abbildung 74: Schärfekurven Fenstergröße 10x10Pixel

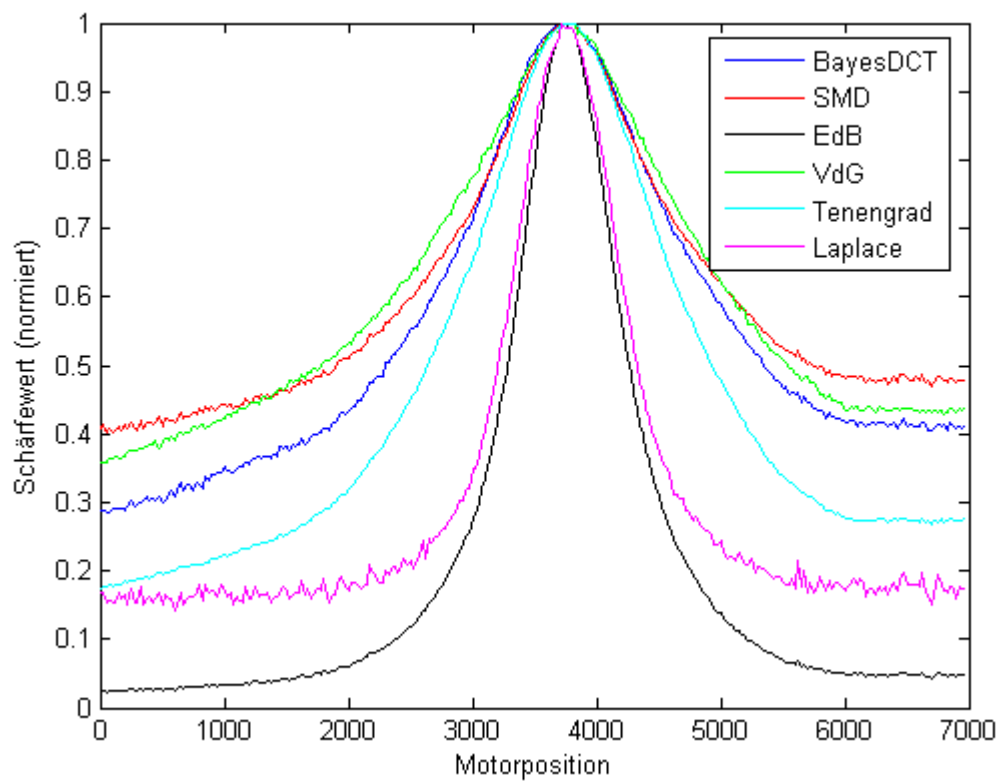


Abbildung 75: Schärfekurven Fenstergröße 50x50Pixel

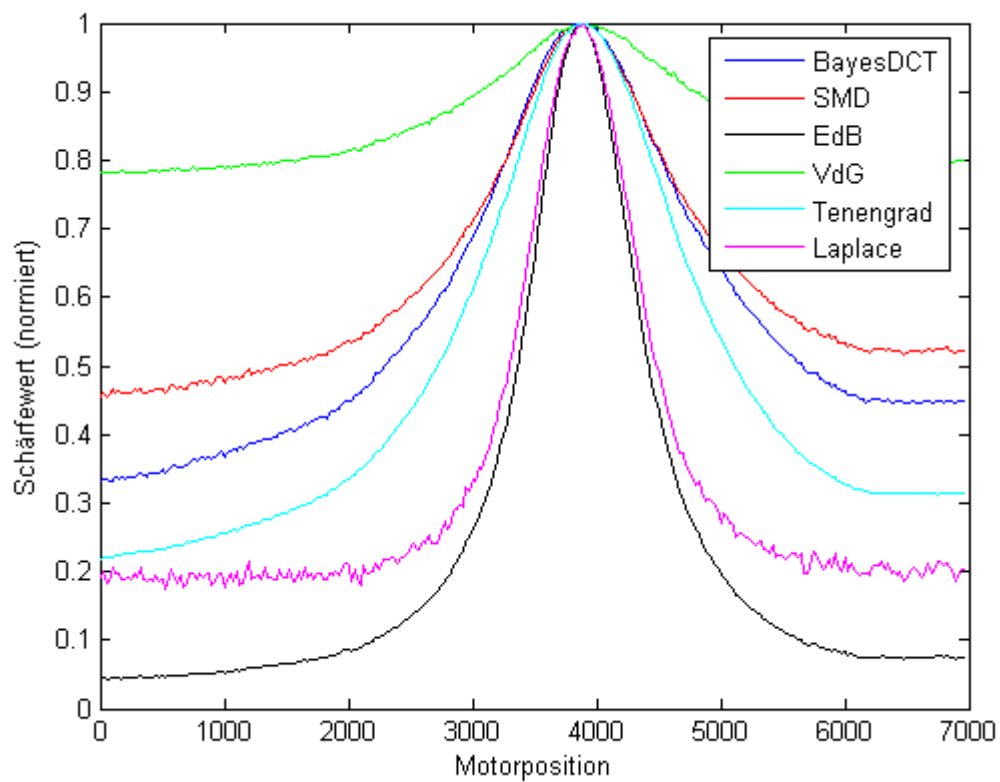


Abbildung 76: Schärfekurven Fenstergröße 100x100Pixel

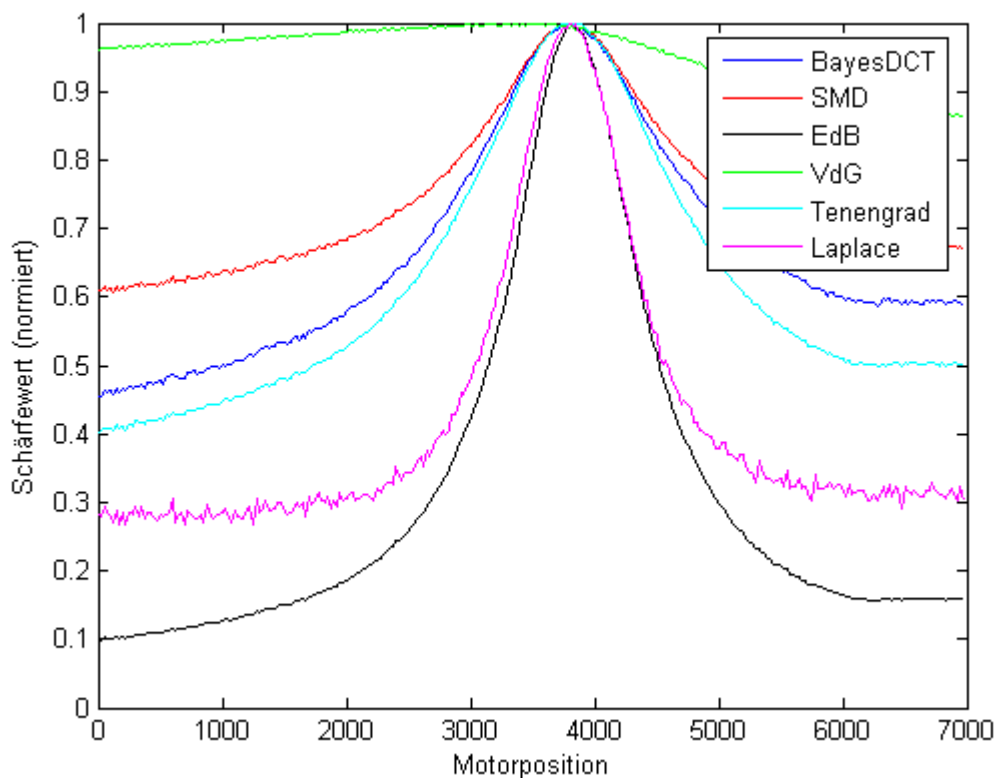


Abbildung 77: Schärfekurven Fenstergröße 200x200Pixel

3.3.6 Zusammenfassung und Auswertung der Messungen mit der HRC-Kamera

Die Untersuchungen der verschiedenen Methoden zur Schärfestimmung von digitalen Bildern anhand der realen HRC-Kamera zeigen unterschiedlich gute Ergebnisse. Bei idealen Bildbedingungen (optimale Beleuchtung, kein Rauschen) können die Ergebnisse der Matlab-Simulation aus Kapitel 3.2 verifiziert werden. Hierbei zeigen nur die Laplace-, und EdB-Methoden schlechte Schärfeverläufe in den Randbereichen. Mit steigendem Rauschen nimmt die Welligkeit in den Randbereichen zu. Das Tenengrad, BayesDCT- und VdG Verfahren stellte sich am robustesten gegenüber Rauschen dar. Der Einfluss von über- sowie unterbelichteten Bildern stellt grundsätzlich kein Problem für die einzelnen Schärfefunktionen dar. Auffällig ist aber, dass es auch hier mit stärker werdender Unterbelichtung zu steigenden Welligkeiten in den Randbereichen kommt. Wichtig für eine erfolgreiche Fokussierung ist, dass die Bildausleuchtung während des gesamten Fokussiervorganges konstant bleibt. Schnelle Änderungen in der Bildhelligkeit, ohne die Integrationszeit daran anzupassen, führen zu Fehlern in den Schärfekurven. Die Wahl der Größe des Fokussierfensters hat ebenfalls Auswirkungen auf ein Teil der Methoden zur Schärfestimmung. Bei einem zu klein gewählten Fenster (hier: 10x10Pixel) kommt es zu einer starken Welligkeit der Schärfefunktionen. Hier zeigt das Tenengrad-Verfahren die geringsten Auswirkungen. Die Welligkeiten lassen mit steigendem Fokussierfenster nach. Besonders wichtig ist die Wahl des Fokussierfensters für die VdG-Methode, welche die Schärfe über eine

Varianzberechnung durchführt. Hierbei ist darauf zu achten, das Fokussierfenster nicht über das Zielobjekt hinaus zu setzen, da es sonst zu Fehlern kommt, wenn der Hintergrund in der Helligkeit stark von dem Zielobjekt abweicht. Zusammenfassend beschrieben sind die Tenengrad-, BayesDCT- bzw. VdG-Verläufe am Besten für eine Fokussierung geeignet, wobei das VdG-Verfahren nicht als primäre Schärfefunktion eingesetzt werden sollte. Besser als primäres Verfahren ist die Tenengrad- oder BayesDCT-Methode geeignet, die eine höhere Robustheit gegen Störungen aufweisen als das VdG-Verfahren.

3.4 Bestimmung der Bildintegrationszeit

Die Bestimmung der optimalen Belichtungszeit des Sensors (Integrationszeit) erfolgt ebenfalls aus den Bildinformationen eines Bildes, da kein externer Belichtungsmesser im PanCam HRC System vorgesehen ist. Ein geeignetes Verfahren hierfür ist die Histogramm Methode [28], wobei durch den Mittelwert der Leuchtverteilung des Bildes, Aussagen über die Beleuchtungsgüte getroffen werden können. Je nachdem ob das Bild unter- oder überbelichtet ist, wird die Integrationszeit dementsprechend angepasst. Die Integrationskurve des Star1000-Bildsensors ist in Abbildung 78 dargestellt. Sie verläuft größtenteils linear. Eine automatische Bestimmung einer optimalen Integrationszeit wird somit einfach und schnell ermöglicht.

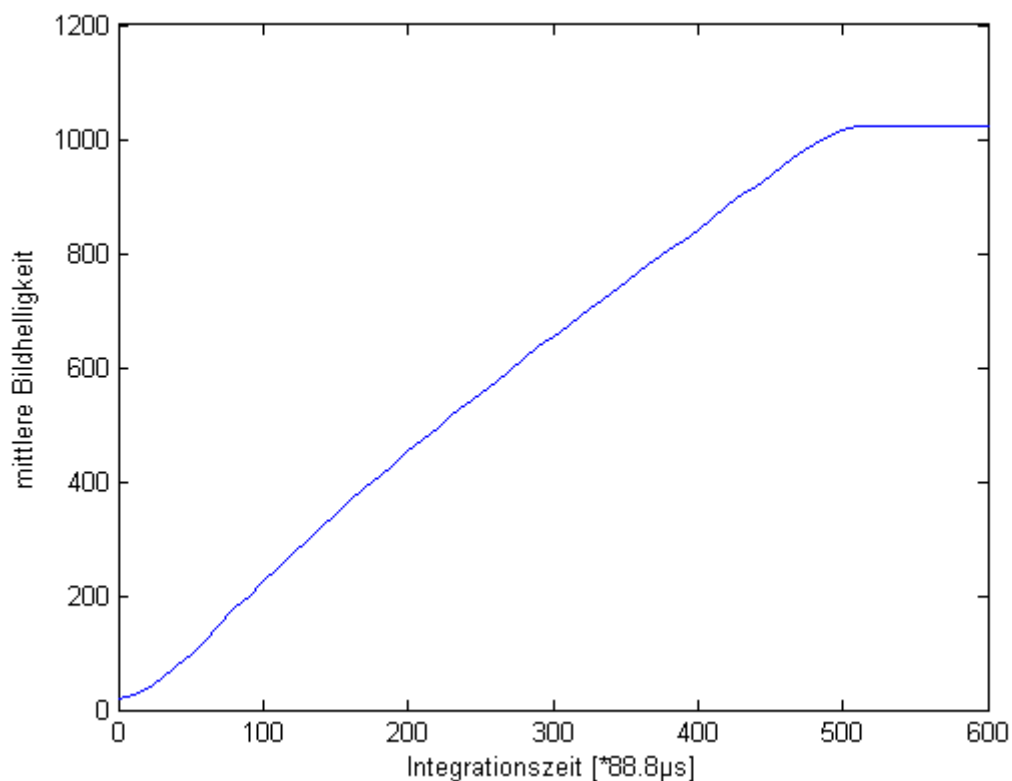


Abbildung 78: Integrationsferlauf Star1000 Sensor

Die Realisierung ist im folgenden Blockdiagramm dargestellt. Zunächst wird die mittlere Bildhelligkeit nach Formel 31 berechnet. Liegt dieser Wert außerhalb eines Toleranzbereiches um den optimalen Wert, so findet eine lineare Veränderung der Integrationszeit statt. Zudem wird der gesamte Belichtungsvorgang überwacht, so dass bei Fehlfunktionen, wie zum Beispiel komplette Dunkelheit, das Verfahren gestoppt werden kann.

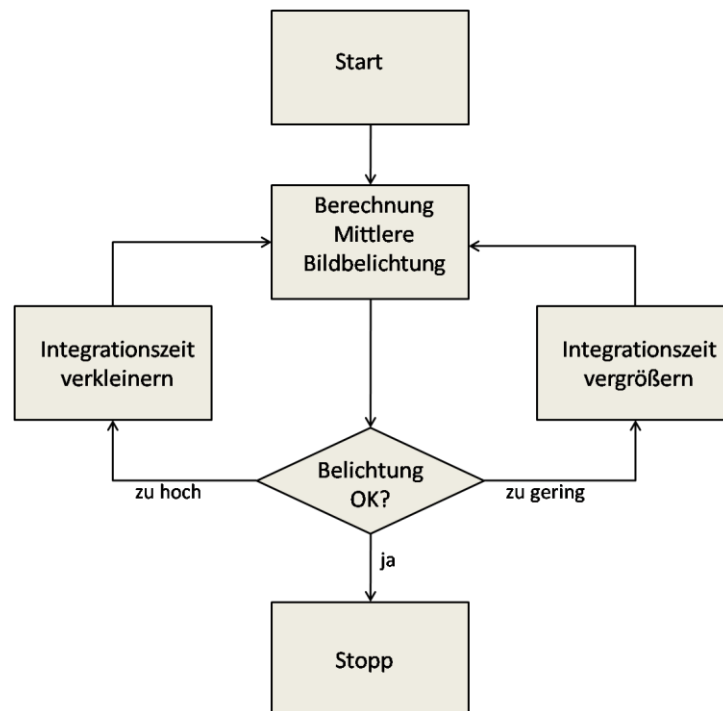


Abbildung 79: Blockdiagramm Belichtungseinstellung

Der Mittelwert der Bildhelligkeit M eines Bildes mit den Pixelpositionen $I(x,y)$, $x \in \{0, \dots, N-1\}$, $y \in \{0, \dots, M-1\}$ wird berechnet, indem der mittlere Grauwert des Bildes wie folgt berechnet wird :

$$M = \frac{1}{N \cdot M} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} I(x,y), \quad (31)$$

Der Dynamikbereich der HRC Kamera beträgt 10Bit. Es können also $2^{10}=1024$ Grauwerte von 0 bis 1023 dargestellt werden, wobei 0 einen schwarzen Bildpunkt und 1023 einen weißen Bildpunkt darstellt. Um ein optimal belichtetes Bild zu erhalten, sollten die Pixelwerte über alle möglichen Werte gleichverteilt sein. Das Histogramm hat in diesem Fall einen breiten Verlauf. Dies ist der Fall, wenn der Mittelwert aller im Bild auftretenden Grauwerte im Bereich $1023/2=511,5$ liegt. Falls das Bild unter- oder überbelichtet ist und stark von dem optimalen Helligkeitswert von 511,5 abweicht, ist eine Anpassung notwendig. Da der Integrationsverlauf des Kamerachips linear verläuft (Abbildung 78), wird hierzu die neue Bildintegrationszeit t_{neu} wie folgt berechnet:

$$t_{\text{neu}} = \frac{\text{optimale Helligkeit}}{M_{\text{alt}}} \cdot t_{\text{alt}} \quad (30)$$

Hierbei ist die optimale Helligkeit = 511,5, M_{alt} die durchschnittliche Bildhelligkeit des unter- bzw. überbelichteten Ausgangsbildes und t_{alt} die Bildintegrationszeit des Ausgangsbildes. In den Abbildungen 80-82 sind verschieden belichtete Bilder und deren Histogramme zu sehen. In den Histogrammen ist außerdem die durchschnittliche Bildhelligkeit aufgetragen. Da es sich hierbei um 8-Bit Bitmap Bilder handelt, ist die optimale Bildhelligkeit $255/2=127,5$. Die vorgestellte Belichtungszeitkorrektur verschiebt somit die durchschnittliche Bildhelligkeit in die Histogramm-Mitte.

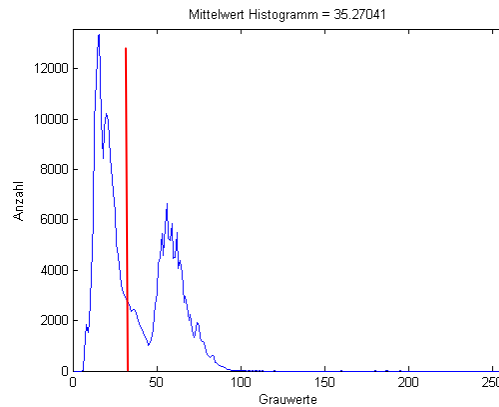
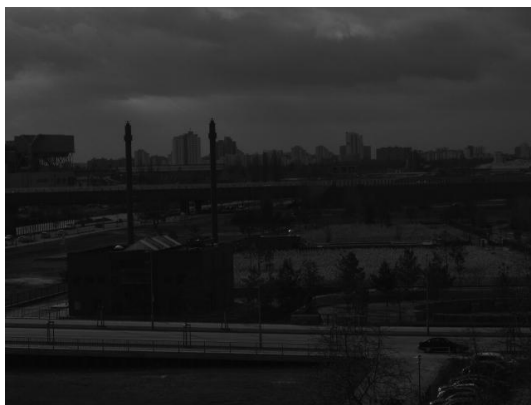


Abbildung 80: unterbelichtetes Bild (links) mit Histogramm (rechts)

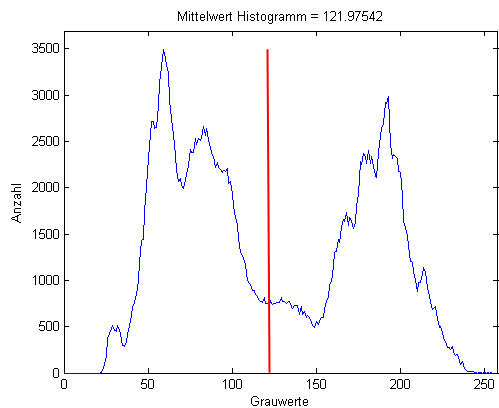


Abbildung 81: gut belichtetes Bild (links) mit Histogramm (rechts)

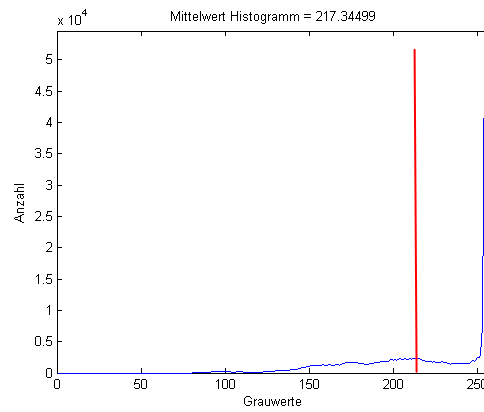


Abbildung 82: überbelichtetes Bild (links) mit Histogramm (rechts)

Fehlsteuerungen dieser Methode, wie sie auf der Erde zum Beispiel bei Bildern, die im Schnee aufgenommen werden, vorkommen können, sind auf der Marsoberfläche nicht zu erwarten. In diesem Fall wird das Zielobjekt trotzdem scharf gestellt. Der Schnee ist aber nicht weiß sondern grau.

4 Suchstrategien

Wie in Kapitel 2.2.4 beschrieben ist, lässt sich durch Verschiebung des Linsensystems der Schärfentiefebereich im Objektraum verschieben. Da nun Methoden bekannt sind, um die Bildschärfe quantitativ zu bestimmen, können nun verschiedene in diesem Kapitel beschriebene Suchstrategien genutzt werden, um die Maximalposition in den Schärfekurven zu finden. Die Eigenschaften des verwendeten Piezo Motors erschweren die Entwicklung optimaler Suchstrategien da:

- die Größe der Motorschritte stark temperaturabhängig ist.
- die Größe der Motorschritte abhängig von der Bewegungsrichtung des Motors ist.
- der Motor keinen Endlagenschalter hat, um zu detektieren, wann eine der beiden Endpositionen erreicht ist.
- die Gesamtzahl der Schritte je nach Richtung bei Zimmertemperatur bei ca. 5800 liegt.
- die einzelnen Schritte sehr klein und nur mit großem technischen Aufwand messbar sind.

Kommerzielle Kameras mit automatischer Fokussierfunktion benutzen in der Regel Schrittmotoren mit fester temperaturunabhängiger Schrittzahl und Schrittgröße. Damit ist eine Positionsbestimmung des Motors und gezielte Bewegung des Motors auf eine vordefinierte Position jederzeit möglich. Die Gesamtzahl der Schritte ist ebenfalls geringerer. Da diese Voraussetzungen für den verwendeten Piezo-Motor nicht zutreffen, ist es nicht möglich, bestehende Systeme identisch zu übernehmen. Ausserdem benutzen hochwertige kommerzielle Kamerasysteme ebenfalls aktive Systeme - wie Entfernungsmesser - zur Einstellung einer optimalen Motorposition.

Speziell für die Bedingungen der HRC-Kamera wurden mehrere Suchstrategien entwickelt. Optimierungskriterien sind in erster Linie die eingestellte Bildqualität, aber auch Randbedingungen wie Fokussiergeschwindigkeit und Gesamtzahl der zwischen der HRC und dem Rover zu übertragenden Bilder. Die Fokussiergeschwindigkeit hängt direkt von der Gesamtanzahl der zu übertragender Bilder ab, da die Übertragung eines Bildes von der HRC-Kamera über die PIU zum Rover ca. 1 Sekunde dauert (vgl. Kapitel 2.1). Diese Übertragung ist notwendig, da der Fokussialgorithmus und die Bildauswertungsroutinen auf dem Rover Computer laufen und die einzelnen Bilder zur Schärfebestimmung notwendig sind. In Abbildung 83 ist ein scharfes Referenzbild und Bilder, die eine verschieden große Anzahl Motorschritte von der Referenzstelle entfernt sind. Es ist zu erkennen, dass optisch eine leichte Unschärfe ab 200 Motorschritte von einer optimalen Motorposition eintritt.

Diese Information ist wichtig für die Optimierung der Suchstrategien, da sie angibt, wie weit eine Abweichung von der optimalen Position möglich ist ohne optische Einschränkungen zu erfahren.

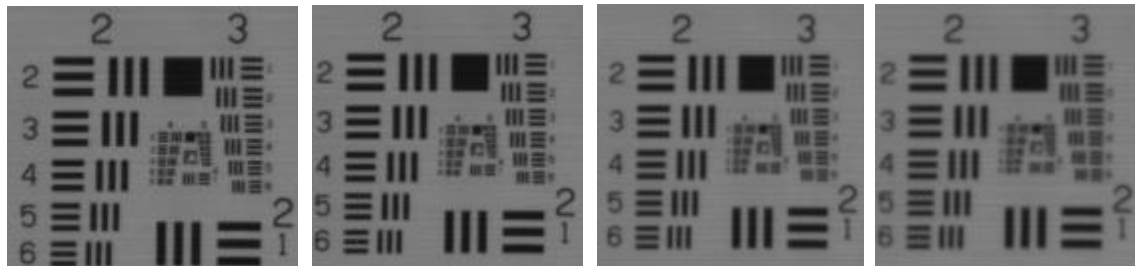


Abbildung 83: von links nach rechts: Referenzbild, Bild 200 Motorschritte vom Referenzbild entfernt, Bild 300 Schritte entfernt, Bild 400 Schritte entfernt

4.1 Entwicklung einer Strategie zur Bestimmung der Schritteigenschaften des Piezo Fokussiermotors

Wie bereits erwähnt, ist die Schrittgröße des Piezo Fokussiermotors nicht konstant. Sie ist stark temperatur- und richtungsabhängig. Der Hersteller gibt die Schrittgröße in einem relativ großen Bereich zwischen 50nm – 2µm an. Die Kenntnis der Schrittgrößen ist für eine optimale Fokussierung aber unabdingbar. Es ist sehr schwierig und aufwendig, die Schrittgröße bei verschiedenen Temperaturen genau zu vermessen, da die einzelnen Schritte sehr klein sind und die Tests in einem Temperaturschrank durchgeführt werden, in dem der Motor nicht direkt zugänglich ist (Abbildung 84). Um trotzdem eine Aussage über das Verhalten des Motors bei verschiedenen Temperaturen treffen zu können und auch den Unterschied in der Schrittgröße zwischen Vorwärts- und Rückwärtsbewegung des Motors angeben zu können, wird ein Verfahren entwickelt, das diese Abhängigkeiten mittels der Schärfefunktionen und Bildhelligkeitsverläufe angeben kann. Hierzu wird die Kamera in dem Temperaturschrank so positioniert, dass sie durch ein Fenster auf ein Testtarget zeigt (Abbildung 84)

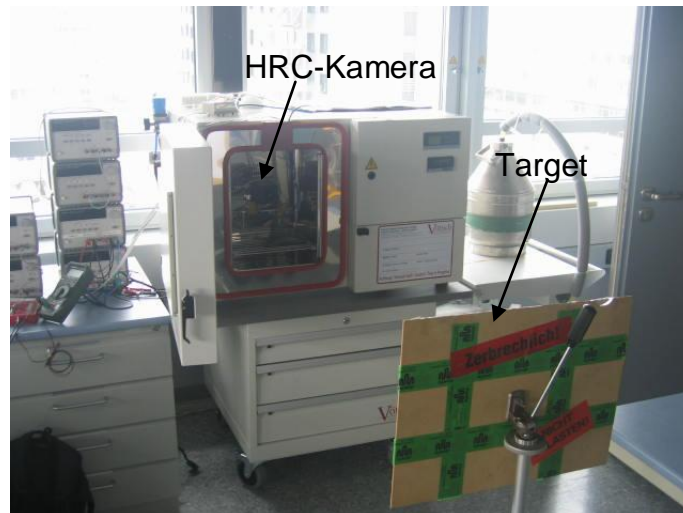


Abbildung 84: Kamera im geöffneten Temperaturschrank mit Testtarget

Nun kann mit dem in dieser Diplomarbeit entwickelten Steuer-Programm die durchschnittliche Helligkeit des Teilfensters (rot) an jeder Motorposition berechnet und abgespeichert werden (vgl. Kapitel 5). Während der Motor in Bewegung ist, ändert sich die durchschnittliche Bildhelligkeit im Fokussierfenster. Dies liegt darin begründet, dass das Linsensystem sich während eines Fokussierdurchlaufes insgesamt um 5cm bewegt und somit in geringer Weise ein Zoom-Effekt auftritt und deshalb der Anteil des weißen Hintergrundes im Fokussierfenster, je nach Motorrichtung, zu- oder abnimmt (Abbildung 85).

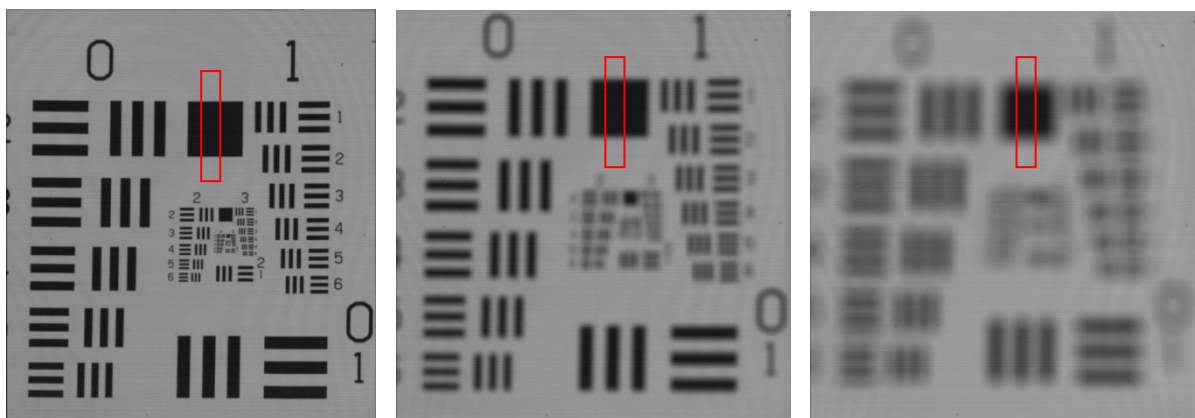


Abbildung 85: unterschiedlich scharfe Testtargets mit Fokussierfenster

Wird nun die Endposition des Motors erreicht, ist dies für die Steuer-Software nicht erkennbar, da es keinen Endlagenschalter gibt. Der Motor stoppt also nicht und führt alle vorgegebenen Schritte aus, ohne dass sich der Motor weiter bewegt. Die Motorendposition kann nun aber über die Auswertung der durchschnittlichen Helligkeit erfolgen, da diese ab der Position in der sich der Motor nicht mehr bewegt, unverändert bleibt. In Abbildung 86 ist die durchschnittliche Helligkeit in Abhängigkeit der Motorstellung bei verschiedenen Temperaturen für die vorwärts Motorrichtung

(Richtung 1) angegeben. Es ist deutlich zu erkennen, wann die Endposition des Motors erreicht wird und der Helligkeitsverlauf die Steigung 0 erreicht.

Analog ist dies für die rückwärts Richtung (Richtung 2) des Motors in Abbildung 87 zu sehen. Auffällig ist, dass die Anzahl der Motorschritte mit sinkender Temperatur zunimmt. Für diese Tests wurde eine andere Version der HRC-Kamera benutzt, die über einen größeren Fokussierbereich verfügt. Der Fokussierbereich dieser Kamera liegt statt 7mm bei 12mm. Deshalb sind in diesem Fall auch mehr Schritte notwendig, um den gesamten Fokussierbereich einmal zu durchfahren. Die Funktionsweise und Eigenschaften des Motors sind aber identisch, weshalb durch diese Tests Rückschlüsse auf die in dieser Diplomarbeit verwendete Kamera gezogen werden können.

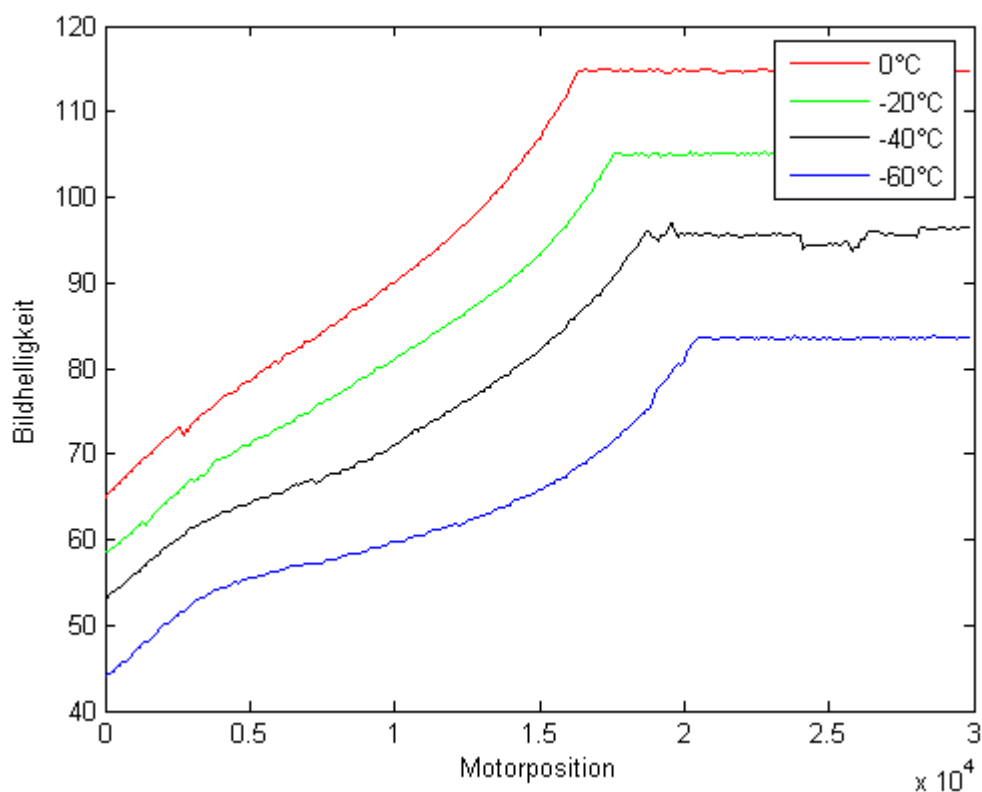


Abbildung 86: Temperaturtest Piezzo-Motor Richtung 1

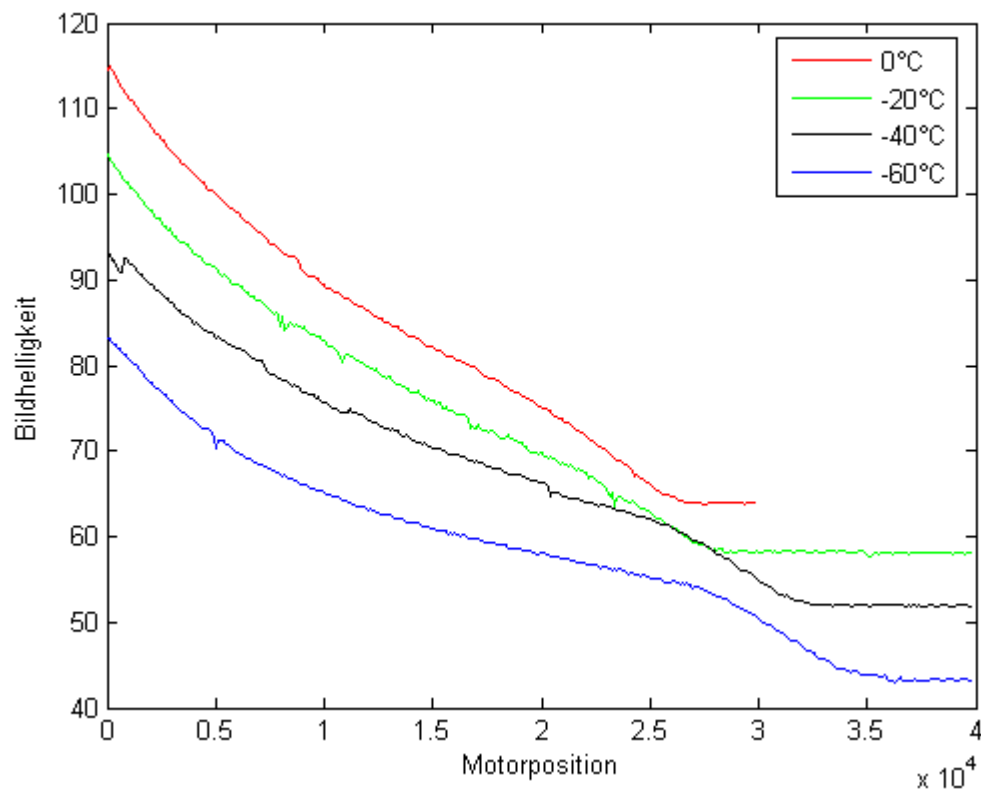


Abbildung 87: Temperaturtest Piezzo-Motor Richtung 2

Da der Motor nicht nur temperatur- sondern auch richtungsabhängig ist, werden nun bei jeder Temperatur die Anzahl der Motorschritte der Vorwärts- und Rückwärtsbewegung miteinander verglichen. In Abbildung 88 ist dies beispielhaft dargestellt. Δx ist hierbei die Differenz zwischen der Anzahl der notwendigen vorwärts und rückwärts Schritte, um den gesamten Fokussierbereich zu durchlaufen. In Tabelle 2 sind die Ergebnisse übersichtlich dargestellt. Zur Berechnung der Länge eines einzelnen Schrittes wird der Fokussierbereich von 12mm durch die Gesamtzahl der Schritte die notwendig sind, um den Fokussierbereich zu durchfahren dividiert. Die resultierende Schrittgröße ist aber nur ein Durchschnittswert, der keine Angaben darüber macht, ob alle Schritte gleich groß sind oder ob überhaupt alle Schritte ausgeführt werden.

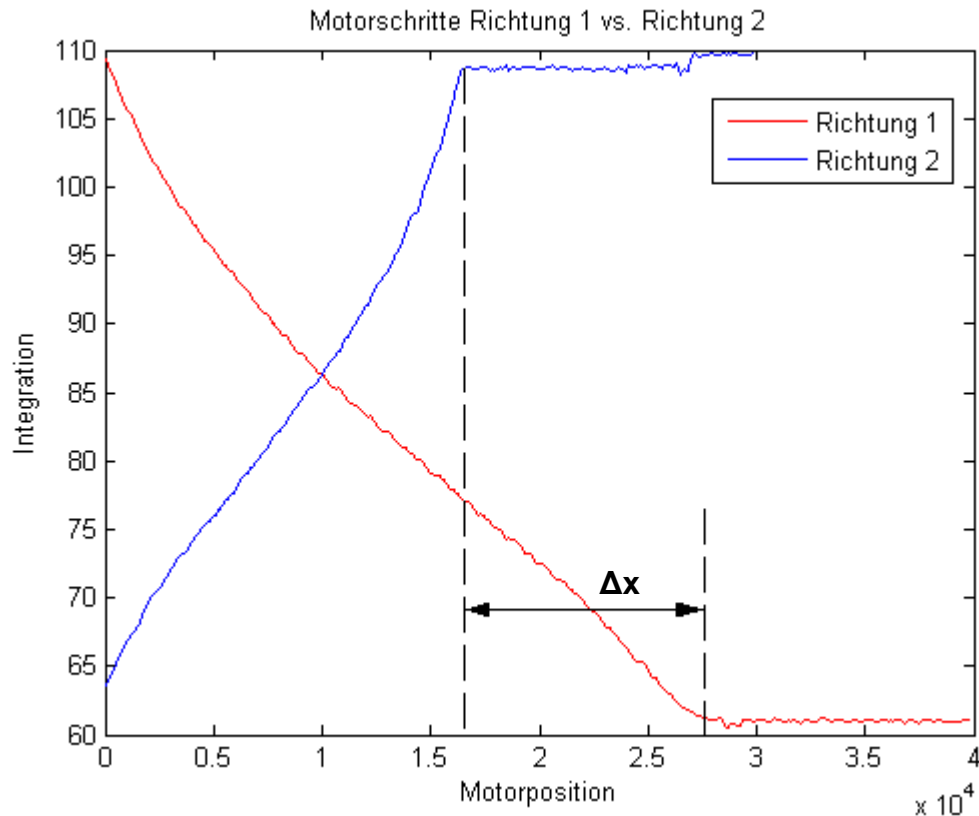


Abbildung 88: Vergleich der Integrationskurven beider Motorrichtungen

Tabelle 2: Übersicht über Ergebnisse des Temperaturtests

T [°C]	Schritte Richtung 1 (vorwärts)	Schrittgröße Richtung 1 S1 [nm]	Schritte Richtung 2 (rückwärts)	Schrittgröße Richtung 2 S2 [nm]	Δx [Schritte]	Verhältnis S2/S1 In %
20°C	24500	48,98	14500	82,76	10000	59
0°C	26600	45,11	16300	73,62	10300	61,28
-20	28500	42,10	17600	68,18	10900	61,75
-40	32700	36,7	18700	64,17	14000	57,19
-60	35900	33,42	20500	58,54	15400	57,10

4.2 Globale Suchstrategie

Bei der globalen Suche wird der gesamte Fokussierbereich durchfahren und alle Schärfewerte an den jeweiligen Motorpositionen gespeichert. Anschließend fährt der Motor an die Position mit dem maximalen Schärfewert zurück. Bevor die Suchstrategie gestartet werden kann, muss der Motor an eine Randposition fahren. Da nicht bekannt ist, an welcher Stelle der Motor sich gerade befindet und es auch nicht möglich ist die Endlage zu detektieren, ist es notwendig, dass der Motor zuerst die maximal mögliche Schrittzahl zurück fährt. Nun befindet er sich an einer Endlage und die Suchstrategie beginnt. Dies ist jedoch sehr zeitaufwendig und energiekonsumierend. Dieses Verfahren ist konzipiert worden, um die Tests der Schärfefunktionen

durchzuführen, da bei diesem Verfahren der gesamte Fokusbereich mindestens einmal komplett durchlaufen wird. Die Schrittweite sowie die Fokustoleranz können variiert werden.

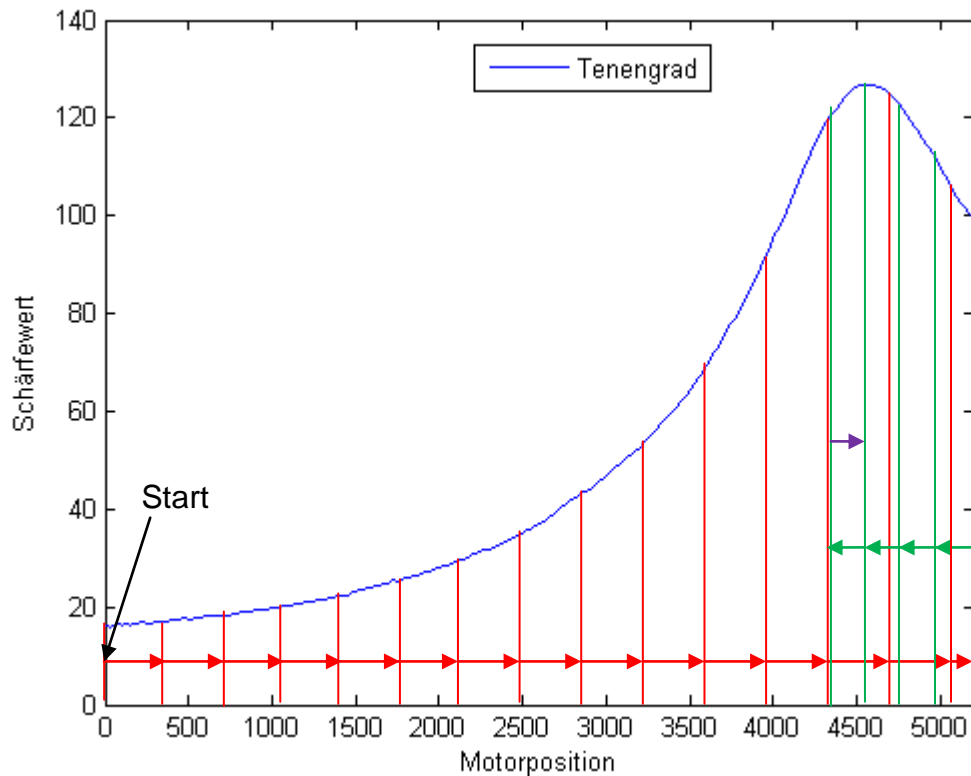


Abbildung 89: globale Suche Suchstrategie

In Abbildung 90 sind Schärfekurven unterschiedlich weit entfernter Objekte aufgetragen. Es ist zu erkennen, dass die Schärfekurven mit steigender Objektentfernung zusammenrücken. Die Entfernung der hyperfokalen Distanz von 41,8m stellt die Grenze des Fokussierbereichs in eine Richtung dar, da alle Objekte von der halben Hyperfokaldistanz bis unendlich scharf abgebildet werden (vgl. Kapitel 2). Die andere Grenze stellt bei diesen Tests die Entfernung von 2,5m dar. Dies liegt darin begründet, dass in dieser HRC-Kamera ein Motor mit einem kleineren Hub von 5mm verwendet wird. Mit einem 7mm Hub-Motor werden die geforderten Entfernungen von 1,5m bis unendlich eingehalten (vgl. Kapitel 4.6).

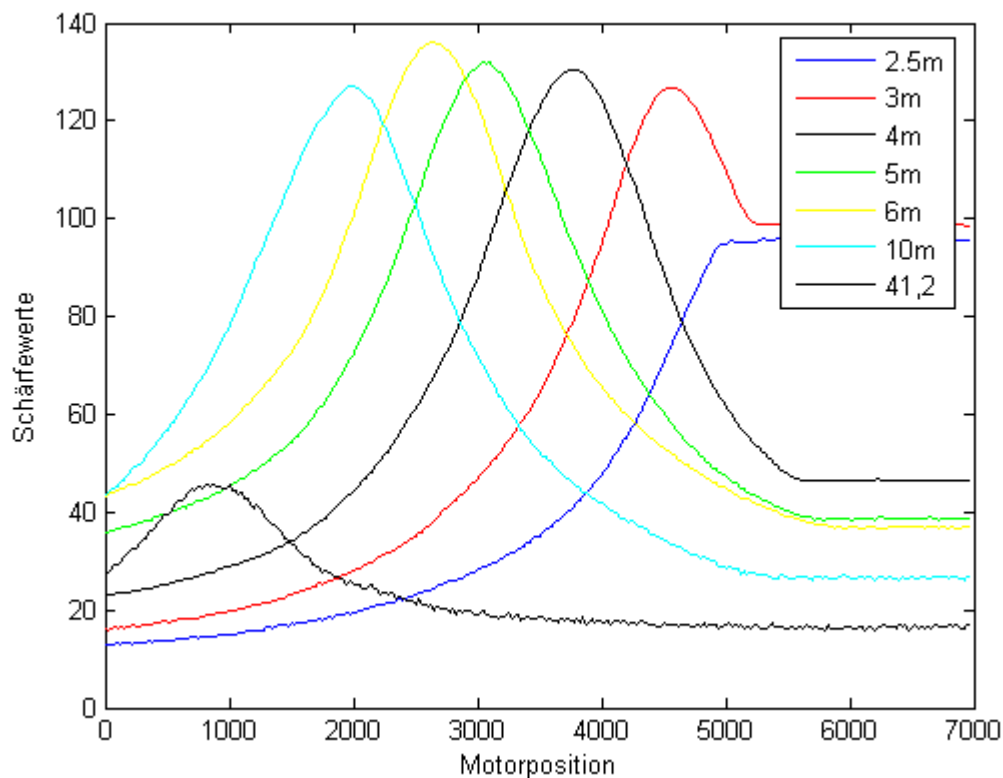


Abbildung 90: Schärfekurven von unterschiedlich entfernten Objekten

4.3 Globale Suchstrategie Nahbereich

Diese Suchstrategie ist dafür ausgelegt, dass das zu fokussierende Objekt sich im Nahbereich der Kamera befindet. Der Nahbereich ist der Bereich mit einer Entfernung von 1.5m-6.5m zur Kamera (vgl. Abbildung 90). Die Suchstrategie funktioniert auch, wenn das Zielobjekt sich nicht im Nahbereich befindet und liefert optimale Bildergebnisse. Die Fokussierdauer ist dann aber wesentlich länger mit einer sehr hohen Zahl zu übertragender Bilder. Der Funktionsablauf dieser Suchstrategie ist im folgenden Diagramm erläutert (Abbildung 91). Zu Beginn fährt der Motor die maximale Schrittzahl in Richtung Nahbereich, in der 1,5m entfernte Objekte scharf dargestellt werden. Von hier aus startet die globale Suche, indem der Motor jede definierte Anzahl von Schritten stoppt und die Schärfe berechnet. Das Schärfemaximum wird jedesmal in einer Variablen gespeichert. Dies wird solange wiederholt bis der aktuelle Schärfewert unter einen berechneten Grenzwert ($\text{Schärfemaximum} - \Delta s$) fällt. Die Toleranz Δs ist notwendig, um robust gegen Welligkeiten der Schärfefunktionen zu werden, die vor allem durch auftretende Belichtungsänderungen während des Fokussiervorgangs, Unterbelichtung des Zielobjektes oder Rauscheinflüsse entstehen. Nun läuft der Motor in die entgegengesetzte Richtung mit kleinerer Schrittweite, bis zu der Stelle an der das Maximum um einen Schritt überschritten ist und fährt diesen wieder einen Schritt zurück.

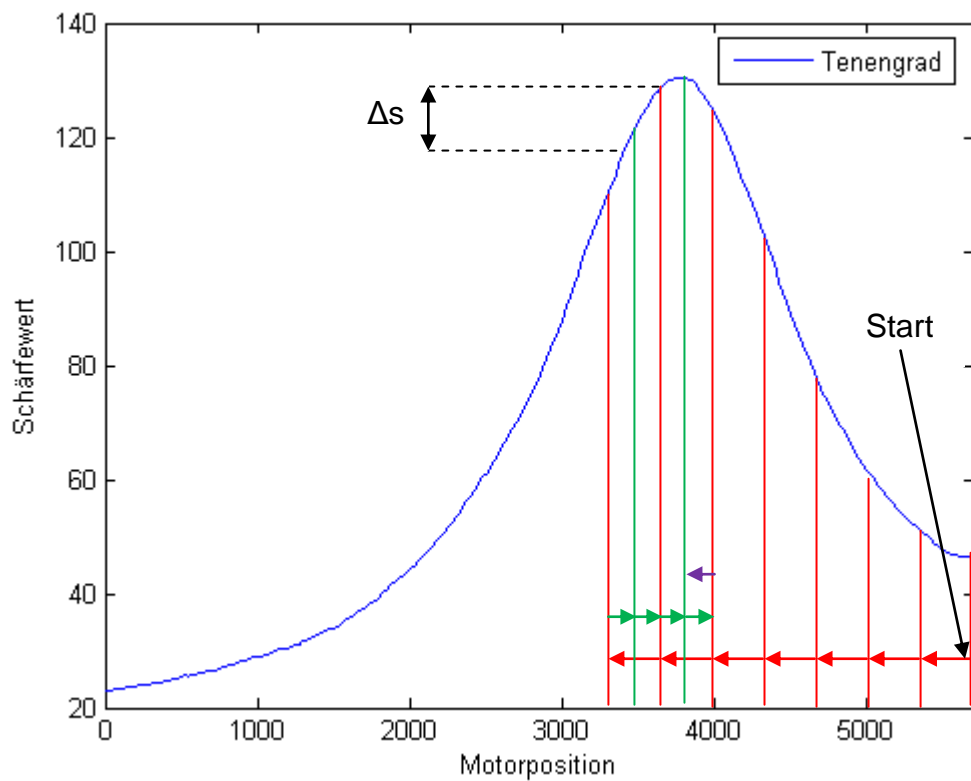


Abbildung 91: Suchstrategie für die globale Suche Nahbereich

4.4 Globale Suchstrategie Fernbereich

Diese Suchstrategie funktioniert analog zu der globalen Suchstrategie für den Nahbereich. Der Unterschied ist nur, dass zuerst die Motorendposition des Fernbereiches angefahren wird und von dort aus die Suche beginnt. Das zu fokussierende Objekt sollte einen Abstand von 6,5m bis unendlich vor der Kamera haben um diese Suchstrategie effizient nutzen zu können (vgl. Abbildung 90).

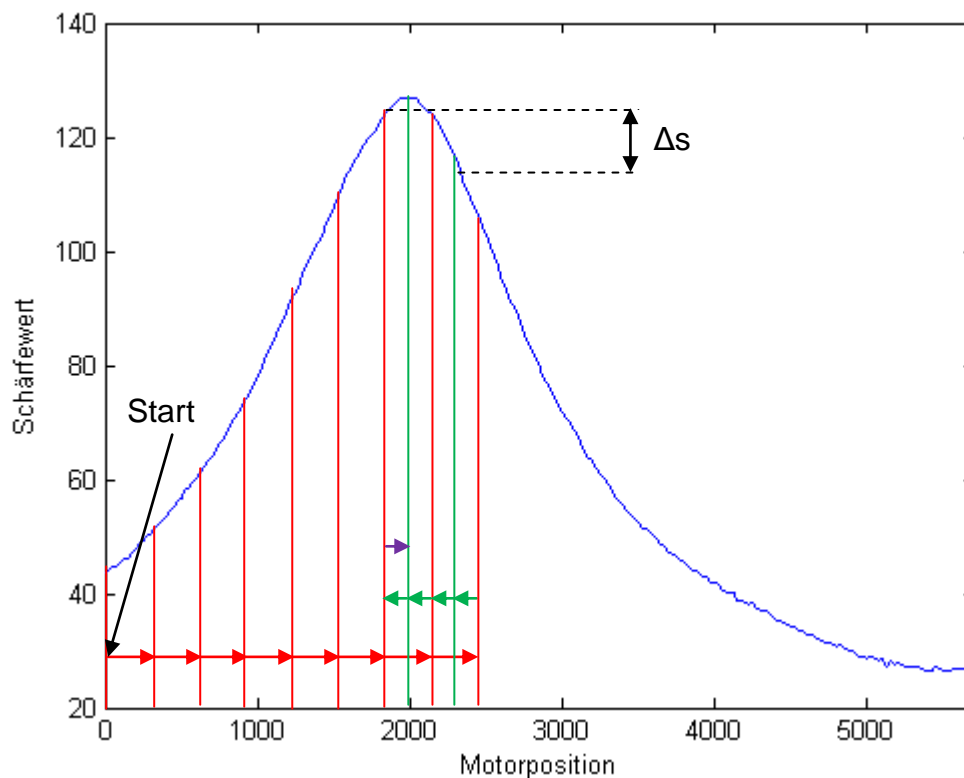


Abbildung 92: Suchstrategie für die globale Suche Fernbereich

4.5 Angepasste Suchstrategie

Die Funktionsweise der angepassten Suchstrategie (Rule-Based Suche) ist in Abbildung 93 erläutert. Diese Suche startet von der Motorposition in der sich der Piezo-Motor gerade befindet. Der Motor braucht nicht die maximale Schrittzahl in eine Richtung zu fahren, um auf jeden Fall an eine Endposition des Motors zu gelangen. Die Fokussierrichtung wird bestimmt, indem von der Startposition aus, die Bildschärfe, an 300 Motorschritten in Richtung 1 (vorwärts) und 300 Motorschritten in Richtung 2 (rückwärts), berechnet und miteinander verglichen wird. Hier ist zu beachten, dass die Schrittgröße in Richtung 1 und Richtung 2 nicht gleich groß ist. Die Suche startet nun in die Richtung der größer werdenden Schärfewerte und ist identisch zu der globalen Suchstrategie des Nah- bzw. Fernbereiches. Die Richtungsdetektion kann in den unscharfen Motorbereichen, die weit entfernt von der optimalen Position sind, schwierig werden, da die Schärfekurven sehr flach verlaufen. Zusätzliche bekannte Probleme wie Belichtungsänderungen, Unterbelichtung oder Rauschen erschweren den Vorgang zusätzlich. Um dem entgegen zu wirken wird die Richtungsdetektion nicht nur mit einem Schärfeverfahren durchgeführt. Falls die Detektion mit dem Standardverfahren nicht möglich ist, wird ein Verfahren als zusätzliche Hilfestellung benutzt, das gute Verläufe in sehr unscharfen Bereichen hat. Als gute Kombination erweist sich (vgl. Kapitel 3) das Tenengrad-Verfahren als primäres Verfahren und das BayesDCT- oder VdG-Verfahren als sekundäres Verfahren.

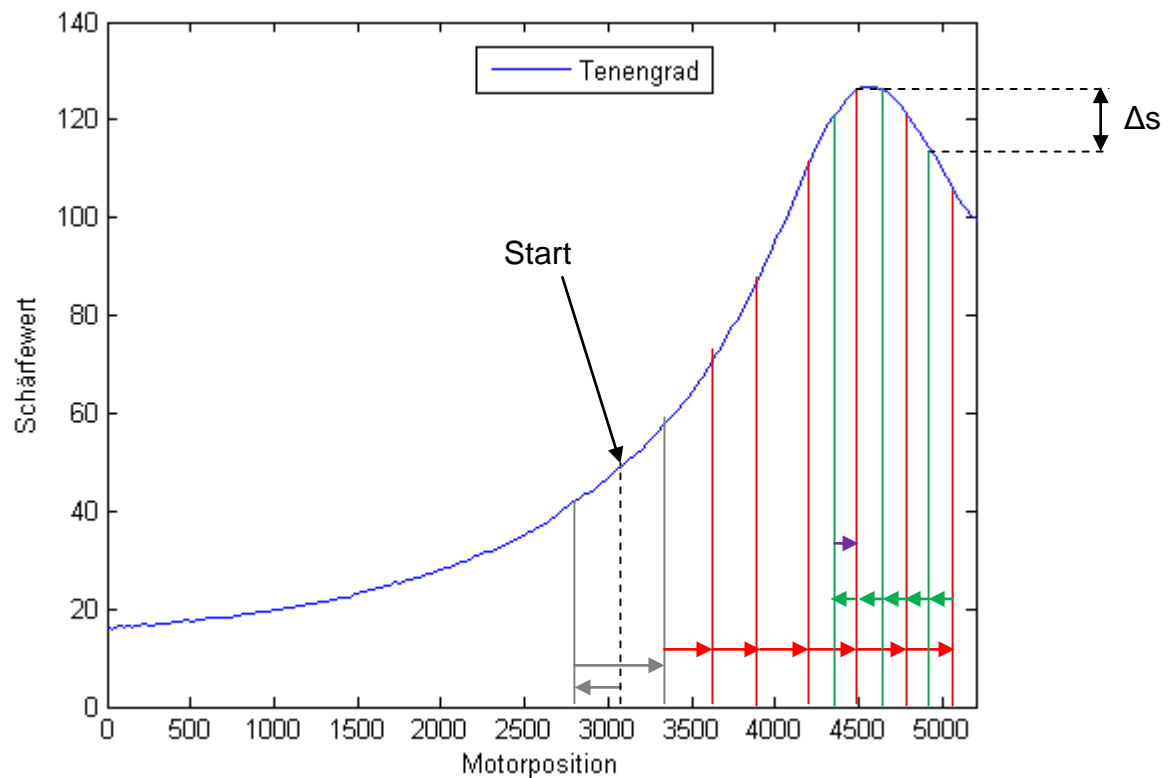


Abbildung 93: Funktionsweise angepasste Suchstrategie

4.6 Schärfentiefe basierende Suchstrategie

Für die HRC-Kamera mit einer Brennweite von 100mm, einer Blende von 8 und 0.03mm Unschärfekreisdurchmesser ergibt sich nach Formeln (4-6) die Tabelle 3. In dieser Tabelle wurden die Tiefenschärfebereiche so hintereinander gelegt, dass sie sich nicht überlappen.

Tabelle 3: hintereinander gelegte Schärfentiefebereiche der HRC-Kamera

#	Abstand Nahpunkt [m]	Abstand Fernpunkt [m]	Abstand fokussierter Punkt [m]	Abstand Bildebene von Linse [m]	Schärfentiefe Bereich [m]
1	1,5	1,61	1,55	0,1071	0,11
2	1,61	1,74	1,67	0,1064	0,13
3	1,73	1,88	1,8	0,1059	0,15
4	1,88	2,05	1,96	0,1054	0,18
5	2,05	2,26	2,15	0,1049	0,21
6	2,26	2,54	2,4	0,1043	0,27
7	2,54	2,88	2,7	0,1038	0,34
8	2,88	3,34	3,1	0,1031	0,45
9	3,33	3,94	3,61	0,1029	0,61
10	3,95	4,84	4,35	0,1024	0,9
11	4,83	6,25	5,45	0,1019	1,42
12	6,22	8,82	7,3	0,1014	2,6
13	8,81	15,2	11,15	0,1009	6,36
14	15,0	53,6	23,5	0,1005	38,6
15	20,9	unendlich	41,8	0,1002	unendlich

Wenn nun nacheinander die 15 Linzenpositionen b angefahren werden, ist der komplette Bereich von 1.5m bis unendlich einmal scharf abgebildet worden (Abbildung 94). Hier können ebenfalls die bereits erläuterten globalen Suchstrategien oder aber auch die angepasste Suchstrategie verwendet werden. Der Unterschied ist nur, dass die 15 vordefinierten Motorpositionen angefahren werden müssten.

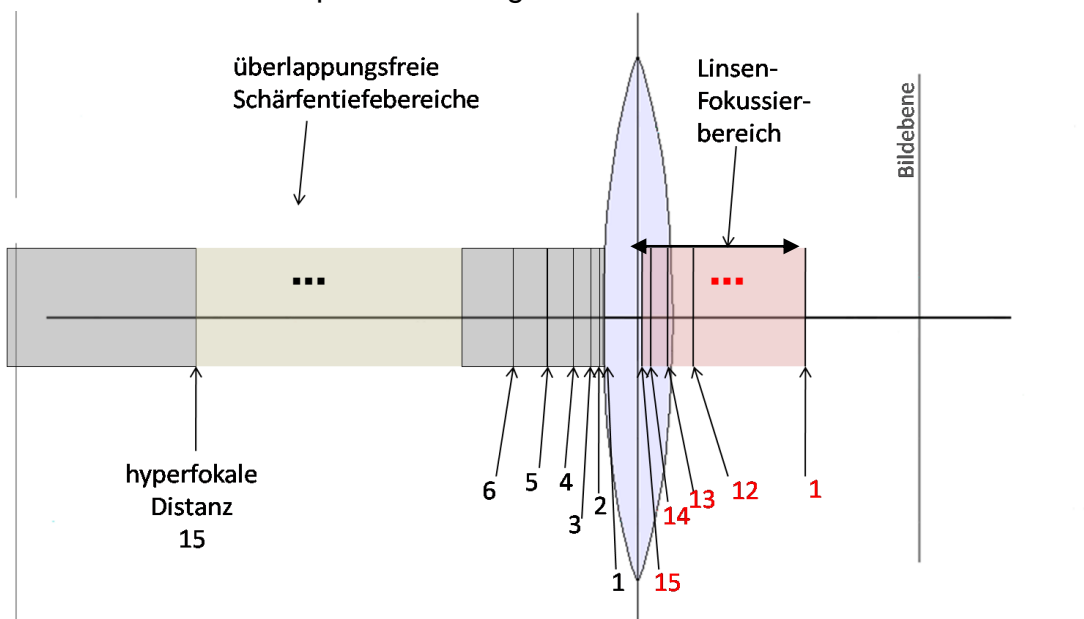


Abbildung 94: hintereinandergelegte Schärfentiefebereiche (schwarz) mit Linzenpositionen (rot) vgl. [14]

Da die Schärfebereiche genau hintereinander gelegt werden, muss die Linse die Position b unendlich genau treffen. Da dies nicht zu realisieren ist, werden die Schärfebereiche so hintereinander gelegt, dass sie sich überlappen. Die Überlappungsgröße ist also abhängig von der Genauigkeit des Motors. Je größer die Überlappungsgröße gewählt wird, desto mehr Haltepositionen sind für die Linse notwendig. Diese Suchstrategie ist für das verwendete HRC-Kameramodell mit dem Piezo-Motor nicht umsetzbar, da der Piezo-Motor nicht exakt oder nur mit sehr großem Aufwand an eine vordefinierte Stelle gefahren werden kann (vgl. Kapitel 2 und 4.1)

4.7 Vergleich und Bewertung der Suchstrategien

Die drei entwickelten Varianten der globalen Suchstrategie zeigen unter Laborbedingungen sehr gute Ergebnisse bezüglich der erreichten Bildqualität und Bildschärfe. Sie unterscheiden sich aber erheblich in der Fokussierdauer. Falls bekannt ist, in welcher Entfernung sich das aufzunehmende Objekt befindet, lässt sich die Suchdauer durch Wahl einer geeigneten globalen Suche-Variante stark verkürzen. Für eine Objektentfernung von 1.5-6.5m erzielt die globale Suche für den Nahbereich die schnellste Fokussierung, verglichen mit den beiden weiteren globalen Suchverfahren. Für eine Objektentfernung von 6.5m bis unendlich, ist die globale Suche für den Fernbereich am schnellsten. Der größte Nachteil der drei globalen Suchstrategien ist, dass diese von einer Endposition des Fokussiermotors aus starten müssen. Das hat zur Konsequenz, dass vor dem eigentlichen Suchstart der Motor mit der maximal möglichen Anzahl der Schritte in die jeweilige Richtung fahren muss. Dies ist notwendig, da weder die aktuelle Motorposition noch das Erreichen einer Endstelle des Motor-Hubs bekannt sind. Dieses Zurückfahren verlängert nicht nur die Fokussierdauer, sondern ist auch sehr energiekonsumierend, da für einen Fokussievorgang deutlich mehr Motorschritte gefahren werden müssen. Die angepasste Suchstrategie (Rule-Based-Suche) umgeht den Nachteil der globalen Suchen und startet direkt an der Position in der sich der Motor gerade befindet. In den Diagrammen 1 und 2 sind die zu einer Fokussierung notwendigen Gesamtbilder, die im Rover zur Schärfestimmung ausgewertet werden, und die nötige Gesamtanzahl der Motorschritte für verschiedene Objektentfernungen und Schrittweiten aufgetragen. Es ist deutlich zu erkennen, dass die globale Suche mit Abstand die meisten Bilder und Motorschritte für einen Fokussievorgang benötigt. Die benötigten Bilder der globalen Suche im Nah- bzw. Fernbereich unterscheiden sich abhängig von der Entfernung des Zielobjektes. Die Gesamtanzahl der Motorschritte ist für beide Verfahren ebenfalls sehr hoch. Die Qualitäten der angepassten Suchstrategie sind in den Diagrammen deutlich zu erkennen. Sowohl die Gesamtanzahl der Bilder zur Schärfestimmung, wie auch die Gesamtanzahl der ausgeführten Motorschritte sind im Vergleich zu den anderen Suchstrategien deutlich geringer. In dieser Versuchsreihe wird die angepasste Suche immer von einer motormittelpunkt Position

aus gestartet. Die erreichte Bildschärfe ist für die jeweiligen Fokussiervorgänge mit unterschiedlichen Schrittgrößen und Suchstrategien identisch.

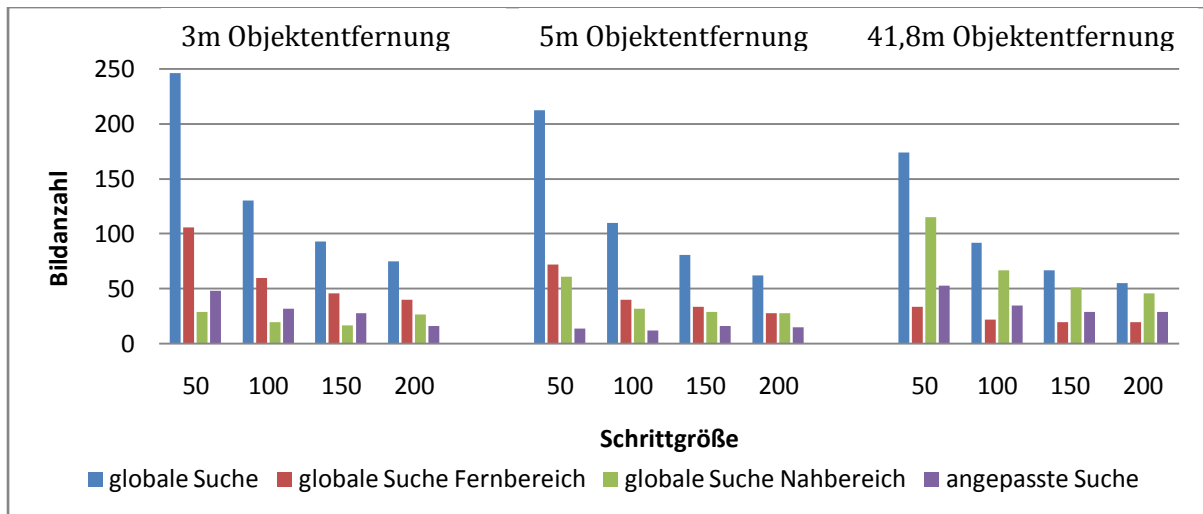


Diagramm 1: Notwendige Gesamtanzahl ausgewerteter Bilder verschiedener Suchstrategien in Abhängigkeit von der Schrittgröße und Objektentfernung

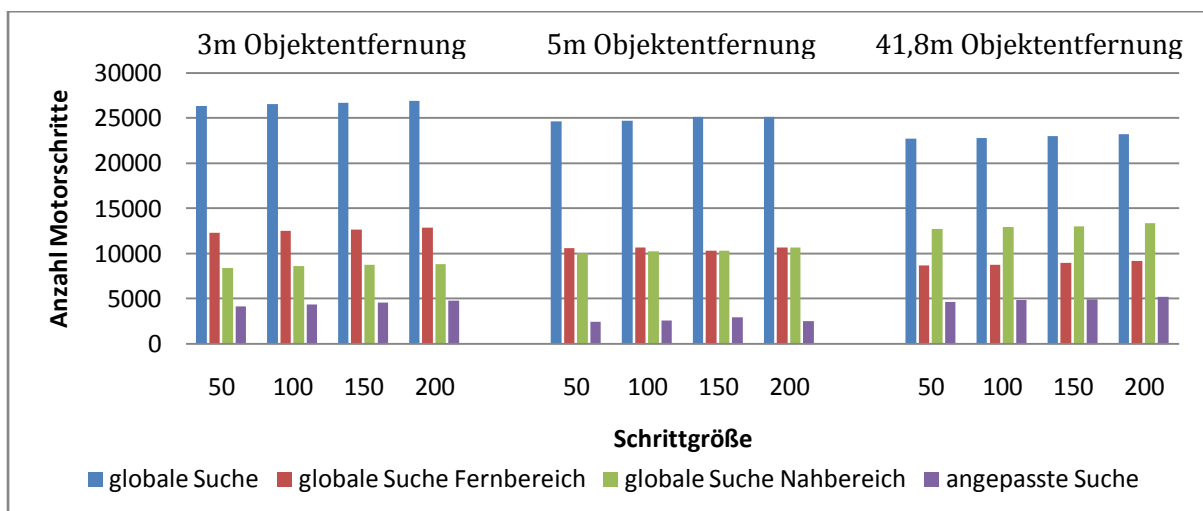


Diagramm 2: Notwendige Gesamtanzahl der Motorschritte verschiedener Suchstrategien in Abhängigkeit von der Schrittgröße und Objektentfernung

Die Suchstrategien sind stark von den verwendeten Schärfestimmungs-Methoden abhängig. Deshalb ist es wichtig, eine gute Methode, wie das Tenengrad- oder BayesDCT Verfahren, zu benutzen. Die auf die Schärfentiefe basierende Suchstrategie würde den Suchvorgang zeitlich optimieren, ist aber bedingt durch den Piezo-Fokussiermotor in der aktuellen Kameraversion nicht anwendbar.

5 Die Kamerasteuerung in Visual C++

Dieses Kapitel behandelt die Zusammensetzung der einzelnen Methoden zur Schärfen- und Belichtungsbestimmung (Kapitel 3) und die verschiedenen Suchstrategien (Kapitel 4) zu einem funktionierenden Autofokus- und Autobelichtung-Gesamtsystem in Visual C++. Es beinhaltet auch die Ansteuerung der Kameraelektronik sowie das Auslesen des Bildsensors, die mittels einer .dll Datei eingebunden werden. Mit dem entwickelten Programm kann die HRC-Kamera sowohl manuell gesteuert werden, als auch die verschiedenen Autofokus- und Autointegrationsmethoden benutzt werden. Die Stromversorgung der Kameraelektronik und der Datenverkehr zwischen der Kamera und dem PC erfolgen über zwei USB-Schnittstellen. Damit das Programm leicht bedienbar ist und von unterschiedlichen Personen benutzt werden kann, wurde eine Windows MFC Oberfläche entwickelt, die im nächsten Teilkapitel erläutert wird. In Abbildung 95 ist ein Blockdiagramm des in C++ umgesetzten Autofokus- und Autointegrations-Gesamtsystems zu sehen:

5.1 Gesamtsystem der Autofokus- und Integrationsmethoden

In diesem Kapitel wird aufgezeigt, wie die verschiedenen Methoden der Schärfenbestimmung digitaler Bilder und die Suchstrategien zu einem Gesamtsystem zusammengesetzt werden. In Abbildung 95 ist zu erkennen, dass nach einem Startbefehl zuerst ein Bild aufgenommen wird und anhand dieses die Helligkeit des Bildes bestimmt wird. Weicht die berechnete Helligkeit mehr als der definierte Toleranzbereich von dem optimalen Helligkeitswert ab, findet eine Anpassung der HRC-Integrationszeit statt (vgl. Kapitel 4.3). Dieser Vorgang wird ständig von der Software überwacht. Diese bricht die automatische Belichtung ab, falls ein optimaler Bildhelligkeitswert nach einer bestimmten Anzahl von Versuchen nicht erreicht wird. Dies ist zum Beispiel bei absoluter Dunkelheit der Fall. Ist die Belichtung eingestellt, wird mit dem Fokussiervorgang fortgefahren. Hierzu wird die Bildschärfe des aktuellen Bildes berechnet und je nach gewählter Suchstrategie die Position mit einem Optimum an Bildschärfe angefahren. Der Fokussiervorgang wird ebenfalls überwacht und bei Fehlfunktionen mit einem Hinweis an den Benutzer abgebrochen. Fehlfunktionen hierbei sind vor allem nicht detektierbare Maximalpositionen der Schärfekurven.

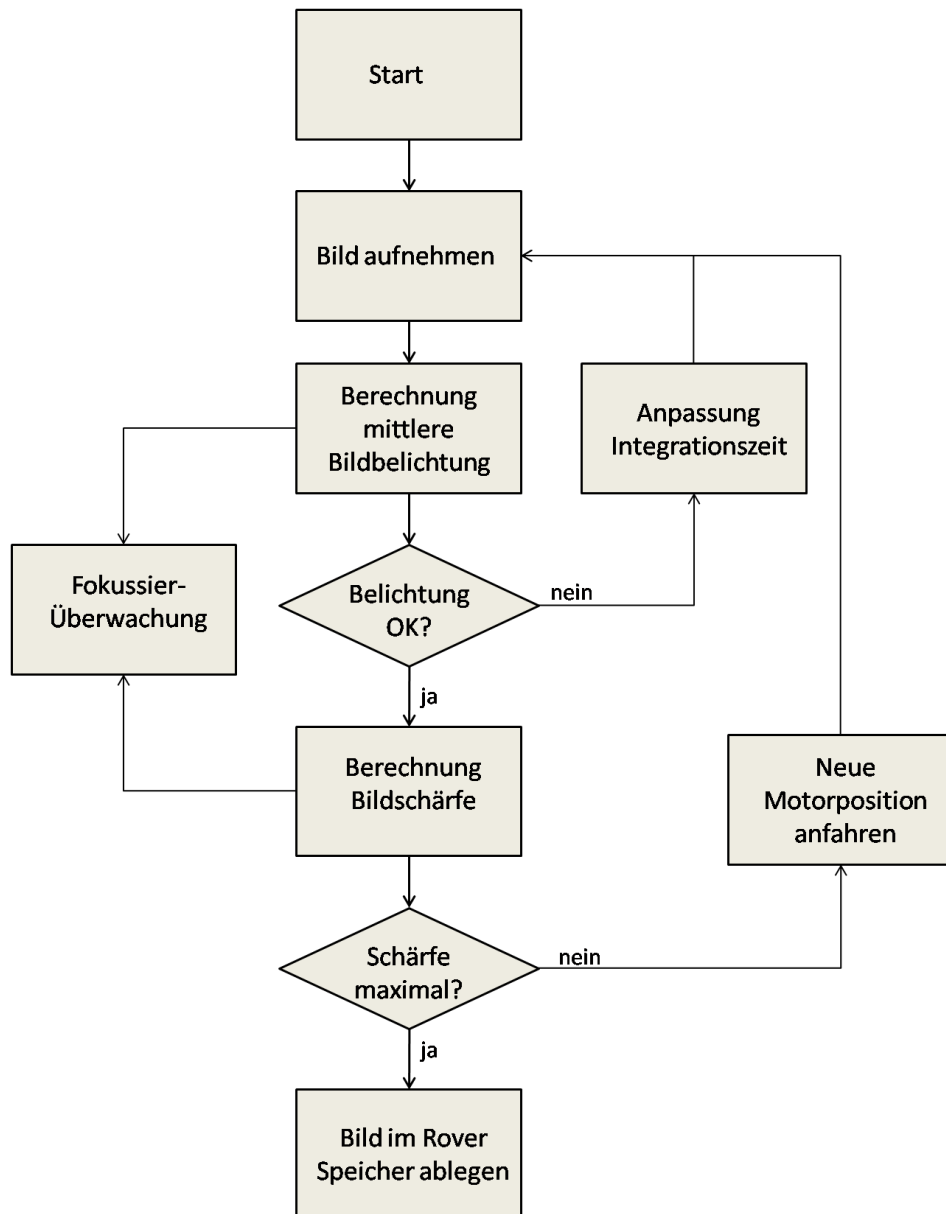


Abbildung 95: Blockdiagramm Gesamtsystem

5.2 Benutzeroberfläche

Zur besseren Bedienbarkeit der Kamerasteuerung wurde eine Benutzeroberfläche erstellt, über welche die einzelnen Parameter einfach zu verändern sind und somit der Gebrauch des Programms durch verschiedene Benutzer vereinfacht wird. Die entwickelte Benutzeroberfläche ist in Abbildung 96 zu sehen. Sie ist in 3 Teile aufgeteilt: Einem Bereich zur manuellen Steuerung, gekennzeichnet als Manual Data Input, einem Autofokus und Autointegrationsteil, sowie einem Textausgabefeld.

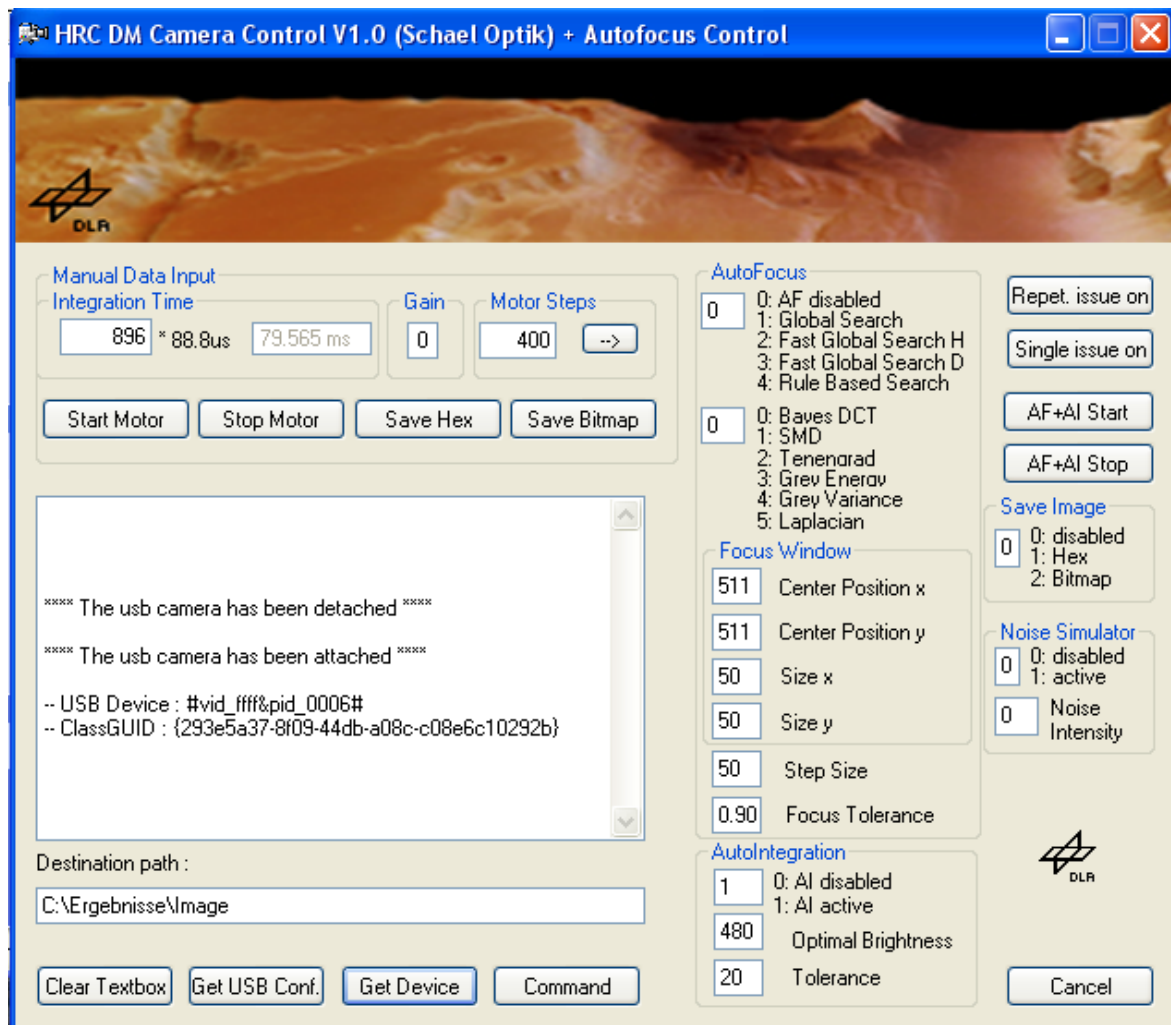


Abbildung 96: Benutzeroberfläche HRC-Kamera

Der manuelle Steuerbereich besteht aus 4 Eingabefeldern für folgende Parameter:

- Integrationszeit (Integration Time: 1 Einheit = 88,8ms)
- Verstärkungsfaktor (Gain)
- Anzahl der Motorschritte (Motor Steps)
- Bewegungsrichtung des Motors (← Richtung 1 (vorwärts), → Richtung 2 (rückwärts))

Eine Vorwärtsbewegung geht in Richtung Nahbereich, eine Rückwärtsbewegung in Richtung Fernbereich.

Durch drücken der „Start Motor“ Taste werden die manuell eingestellten Werte an die Kameraelektronik gesendet und ausgeführt. Durch Betätigung der „Save Hex“ und „Save Bitmap“ Knöpfe wird das aktuelle Bild als 10-Bit Rohdaten oder 8-Bit Bitmap gespeichert. Der Speicherort der Bilder kann im Feld „Destination Path“ angegeben werden.

Die Einstellung der Autofokus und Autointegrationszeit sowie die Auswahl eines Fokussierfensters kann über verschiedene Eingabefelder getätigt werden. Die

Verschiedenen Suchstrategien der Motorsteuerung (vgl. Kapitel 4) und die einzelnen Methoden der Schärfestimmung (vgl. Kapitel 3) werden im Bereich „AutoFokus“ ausgewählt. Die Globale Suche ist in erster Linie für Testzwecke. In dieser Option wird der gesamte Motorbereich durchfahren. Der Motor stoppt alle im Feld „StepSize“ angegebenen Schritte, berechnet die Schärfewerte des aktuellen Fokussierfensters und schreibt die Ergebniswerte als Tabelle in eine Textdatei (Tabelle 3). Die Spalte Position gibt die jeweilige Motorposition an, die Spalte Helligkeit gibt die nach Formel (31) berechnete mittlere Bildhelligkeit an.

Die Tabelle hat folgenden Aufbau und kann in andere Programme, wie Matlab, zur weiteren Verarbeitung exportiert werden:

Tabelle 4: Speicherformat der Messwerte in der globalen Suche

Position	Bayes-DCT	SMD	EdB	VdG	Tenengrad	Laplace	Helligkeit
0							
...
n							

Im Eingabefeld „Save Image“ wird angegeben, ob und in welcher Form das nach der Fokussierung erhaltene Bild abgespeichert wird. Der Speicherort wird im Feld „Destination Path“ angegeben. Der Bereich „Auto Integration“ beschreibt die nötigen Parameter der Autointegrationsfunktion. Hier kann diese Funktion aktiviert oder deaktiviert und eine gewollte durchschnittliche Bildhelligkeit eingestellt werden. Die Toleranz gibt eine akzeptierte Abweichung des Ist-Wertes zur eingetragenen Belichtungszahl an. Wie in Abbildung 96 zu sehen, kann die durchschnittliche Belichtungszahl in diesem Beispiel, einen Wert von 460-500 annehmen. Für alle anderen Werte wird die Belichtungszeit des Sensors solange geändert, bis der Toleranzbereich erreicht ist (vgl. Abbildung 79). Im Bereich „Focus Window“ wird die Größe und Position des Fokussierfensters bestimmt. Es kann der Mittelpunkt des Fensters (Center Position x, Center Position y) und die horizontale- bzw. vertikale-Größe des Fensters (Size x, Size y) angegeben werden.

Die Schrittgröße (Step Size) und Fokussiertoleranz (Fokus Tolerance) kann ebenfalls eingegeben werden. Im Bereich „Noise Simulator“ kann zu Testzwecken Rauschen mit verschiedenen Intensitäten zum Bild hinzuaddiert werden (vgl. Formel 29). Der Knopf „Rept. Issue on“ aktiviert eine Video Sequenz der Kamerabilder (Abbildung 97), „Single issue“ on erzeugt ein Standbild. Die Autofokus- und Autointegrationsprozeduren werden über den Knopf „AF+AI Start“ gestartet. In einem Informationsfeld werden aktuelle Statusinformationen der Kameraverbindung, Fehlermeldungen oder Schärfewerte ausgegeben.

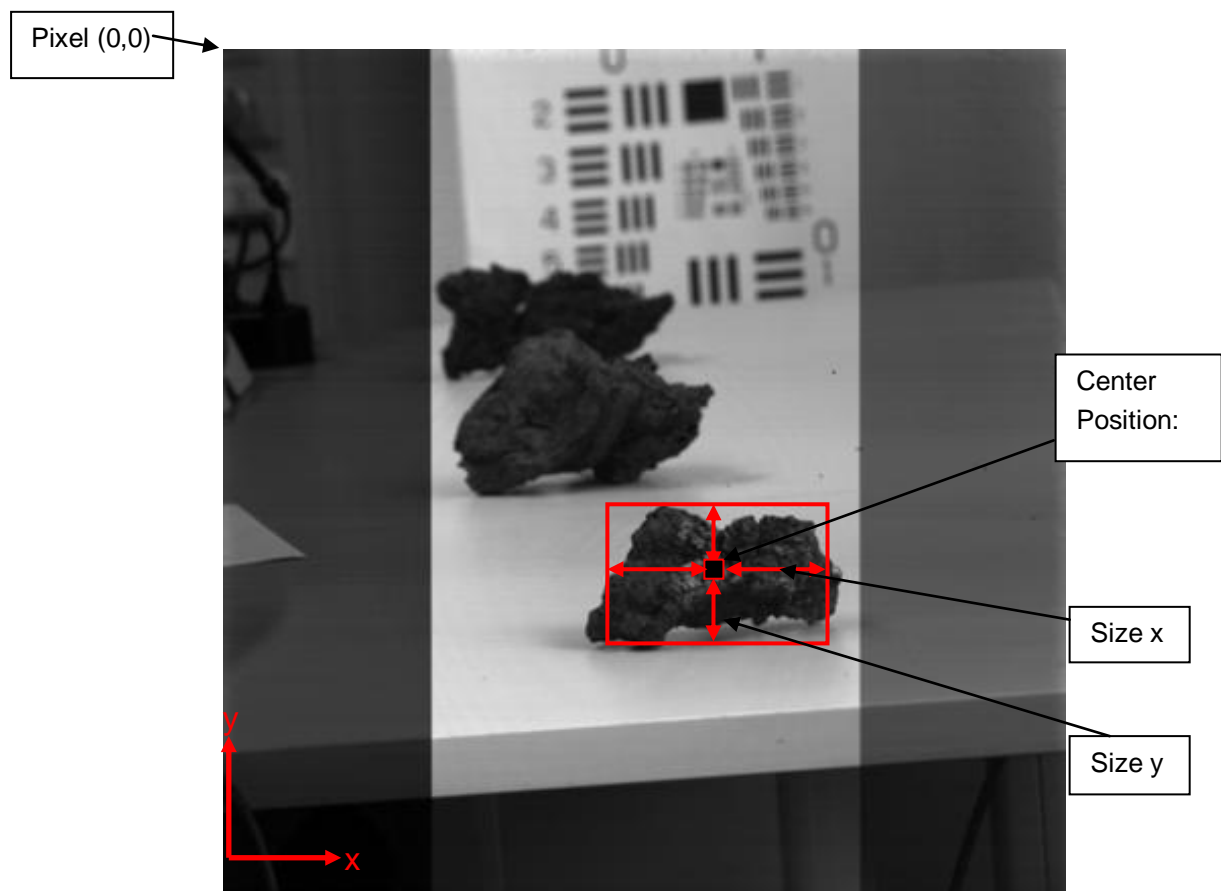


Abbildung 97: Live-Bild mit Fokussierfenster

6 Zusammenfassung und Ausblick

Für den wissenschaftlichen Erfolg der ESA ExoMars Mission ist es erforderlich hochauflösende Fotos von nahen- und weit entfernten Objekten auf der Marsoberfläche in optimaler Qualität aufzunehmen. Hierzu ist es notwendig, ein Autofokus- und Autobelichtungssystem auf Basis der Bildbearbeitung einzusetzen, das die Bildqualität optimiert. Da bis zum heutigen Zeitpunkt weltweit erst eine fokussierbare Kamera für den Einsatz im Weltraum entwickelt wurde, sind die Erfahrungen auf diesem Gebiet sehr gering. Diese Diplomarbeit trägt dazu bei, das bestehende Wissen über Autofokussier- und Autobelichtungssysteme für erdgebundene Kameras auf die wissenschaftliche PanCan-HRC Kamera der ESA ExoMars Mission zu übertragen und an die schwierigen Weltraumbedingungen anzupassen. Das in C++ entwickelte Gesamtsystem für die HRC-Kamera zeigt hierbei sehr gute Ergebnisse.

Zu Beginn dieser Arbeit werden verschiedene Methoden vorgestellt, welche die Bildschärfe von digitalen Bildern quantitativ bestimmen. Eine verlässliche quantitative Bestimmung der Bildschärfe ist für das Suchverfahren, welches die Stelle im Fokussierbereich mit maximaler Bildqualität sucht, unerlässlich. Hier haben sich sowohl in Matlab-Simulationen als auch in realen Tests mit einem Prototyp der HRC-Kamera die Tenengrad-, BayesDCT- sowie VdG-Verfahren als sehr gut herausgestellt. Speziell das Tenengrad-Verfahren zeigt gute Ergebnisse bei verrauschten bzw. schlecht belichteten Bildern. Besonders wichtig für die Schärfekurven ist neben einem ausgeprägten Maximum, an der Stelle der größten Bildschärfe, ein kontinuierlicher Abfall der Schärfewerte mit zunehmender Bildverschlechterung. Dies ist sehr wichtig für die Suchverfahren, um eine korrekte Motorrichtung in die Richtung des Maximums der Bildschärfe bestimmen zu können. Das VdG-Verfahren zeigt besonders in den Randbereichen der Schärfekurven sehr gute Verläufe und kann als Hilfsverfahren in den Suchstrategien eingesetzt werden. Insgesamt werden fünf verschiedene Suchverfahren vorgestellt. Vier der fünf Suchverfahren sind an die Eigenschaften des eingesetzten Piezo-Motors, wie eine Temperaturabhängigkeit der Schrittgröße, ein Unterschied in der Schrittgröße zwischen Vorwärts- und Rückwärtsbewegung, die Unkenntnis der aktuellen Motorposition sowie das Fehlen eines Endlagenschalters, angepasst und zeigen gute Ergebnisse im Bezug auf die Bestimmung der optimalen Bildschärfe. Die globale Suchstrategie durchläuft den gesamten Fokussierbereich und kehrt anschließend an die Stelle der maximalen Bildschärfe zurück. Da diese Strategie zwar optimale Bildqualitäten liefert aber sehr langsam ist, wurden weitere Strategien entwickelt. Hierzu zählen die globale Suche im Nah- bzw. Fernbereich. Diese Suchstrategien sind besonders gut geeignet wenn bekannt ist, in welcher Entfernung das zu fokussierende Objekt positioniert ist. Die Rule-Based Suchstrategie zeigt

hinsichtlich der Geschwindigkeit beste Eigenschaften, da sie im Vergleich zu den anderen Strategien die wenigsten Zwischenstopps benötigt und von jeder beliebigen Motorposition direkt starten kann ohne zuerst an einen Motorendpunkt fahren zu müssen. Um diese Suchstrategie vor allem in weit von der optimalen Motorposition entfernten Bereichen zu verbessern, wird für die Richtungsvorhersage sowohl das Tenengrad, als auch das in den Randbereichen gut funktionierende VdG-Verfahren eingesetzt. Das VdG-Verfahren kommt aber nur zum Tragen wenn das Tenengrad-Verfahren keine verlässlichen Aussagen über die Bildqualität und zu wählende Motorrichtung treffen kann. Das fünfte Suchverfahren nutzt das Vorhandensein von Schärfentiefebereiche um mit möglichst wenigen vordefinierten Zwischenstopps an den Zielpunkt zu gelangen. Die Stopp-Positionen sind so gewählt, dass die Schärfentiefebereiche hintereinander gelegt werden und so der gesamte Bereich von 1.5m bis unendlich mit der minimalen Stoppanzahl durchfahren werden kann. Dieses Verfahren ist aber mit dem Einsatz des Piezo-Motors und der Unkenntnis der aktuellen Motorposition nicht umsetzbar. Um genauere Erkenntnisse über die temperaturbedingten Motorabhängigkeiten zu erlangen, wird ein einfaches und leicht umsetzbares Verfahren erläutert, das mit Hilfe der Methoden zur Beschreibung der Bildqualität die Schrittgrößen des Motors bei verschiedenen Temperaturen bestimmt. Dieses Verfahren zeigt, dass die Schrittgröße des Motors mit fallenden Temperaturen drastisch abnimmt und, dass die Schrittgröße der Vorwärts- und Rückwärtsbewegung ebenfalls unterschiedlich groß ist.

Die im Rahmen dieser Diplomarbeit entwickelte Autofokus- und Autobelichtungssteuerung zeigt sehr gute Ergebnisse im Bezug auf die Bildqualität. Eine Weiterentwicklung der HRC-Kamera bezüglich der Schnelligkeit des Fokussier- und Belichtungs Vorganges ist weiter möglich und sinnvoll. Die Schnelligkeit ist in dem Gesamtsystem von vielen Faktoren abhängig. Der Hauptanteil ist die große Anzahl von Bildern, die während eines Fokussier Vorgangs zwischen Kamera, PIU und Rover übertragen werden müssen. Die Anzahl der zu übertragenden Bilder lässt sich mit dem Einsatz eines temperaturunabhängigen Schrittmotors minimieren. Mit diesem Motor kann die auf der Schärfentiefe basierende Suchstrategie benutzt werden, die mit maximal 16 zu übertragenden Bildern pro Fokussier Vorgang auskommt aber nicht mit einem Einsatz des Piezo-Motor realisierbar ist. Ein weiterer Vorschlag zur Optimierung der Fokussiergeschwindigkeit ist die Übertragung nur der für die Fokussierung notwendigen Teilbilder zwischen HRC-Kamera und Rover, da die Datenverbindung zwischen PIU und HRC-Kamera mit 478MHz relativ langsam ist. Da die HRC einen APS-Sensor benutzt, ist es ebenfalls technisch umsetzbar nur die für die Fokussierung notwendigen Teilbilder von dem Sensor und nicht wie bisher das gesamte Bild auszulesen und zu dem Rover Computer zu übertragen.

Literaturverzeichnis

- [1] http://esamultimedia.esa.int/docs/ESA_ExoMars_Mission_Information_Sheet_rev01Feb08.pdf, ESA ExoMars Mission Information Sheet, Gesehen: 10.12.2008
- [2] R.M. Bonnet, J.P. Swings: The Aurora Programme, ESA, Noordwijk, 2004
- [3] D.B. Hermann: Das Weltall, Beck Verlag, 2006
- [4] http://www.esa.int/SPECIALS/ExoMars/SEMK39JJX7F_0.html, Gesehen: 10.01.2009
- [5] http://www.esa.int/SPECIALS/ExoMars/SEMSZIAMS7F_0.html, Gesehen: 10.01.2009
- [6] S.J. Kapurch, N.E. Rainwater: NASA Systems Engineering Handbook, NASA, 2007
- [7] N Schmitz, D.Barnes, A.Coates, A. Griffiths, R. Jaumann, E. Hauber, H.Michaelis: The High Resolution Channel of the ExoMars Panoramic Camera, Präsentation
- [8] EADS ASTRIUM
- [9] <http://spacewire.esa.int>, Gesehen: 05.02.2009
- [10] ExoMars Panoramic Camera Experiment, Interface Control Document, EXM-PL-ICD-ESA-00001, Issue 1, Rev 0
- [11] <http://solarsystem.dlr.de/Missions/express/marsfacts/marsfactssheet.shtml>, Gesehen: 26.11.2008
- [12] H. Kuchling: Taschenbuch der Physik, Fachbuchverlag Leipzig, 2001
- [13] T. Maschke: Digitaleameratechnik, Springer Verlag, 2004
- [14] http://upload.wikimedia.org/wikipedia/de/d/d1/Optik_Schaerfentiefe_Strahlengang_HF_01.png, Gesehen: 16.07.2008
- [15] G.Weißer, K. Holst: Einführung in die industrielle Bildverarbeitung, Franzis Verlag 2006
- [16] M. Kristan, J.Perz, S. Kovacic: A Bayes-Spectral-Entropy-Based Measure of Camera Focus Using a Discrete Cosine Transform,
- [17] N.K. Chern., P.A Neow., M.H., Ang Jr: Practical Issues in Pixel-Based Autofocusing for MachineVision, Int. Conf. On Robotics and Automation, 2001
- [18] S.K. Nayar: Shape from Focus, The Robotics Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, 1989
- [19] M. Subbararo, T. Choi, A. Nikzad: Focusing Techniques, Tech. Report 92.09.04, Stony Brook, Computer Vision Laboratory, 1992
- [20] L.B. Wolff, S.A. Shafer, G.Healey: Radiometry, A K Peters, Ltd., 1992
- [21] J.C.Bezdek, J.Keller, R.Krisnapuram, N.R.Pal: Fuzzy Models and Algorithms for Pattern Recognition and Image Processing, Springer Verlag 2005
- [22] NASA, Johnson Space Center

- [23] B.G. Batchelor, S.S Solomon, F.M. Waltz: Machine Vision Applications, architectures, and systems integration, The Society, 1992
- [24] I.N. Bronstein, K.A. Semendjajew, G. Musiol, H.Mühlig: Taschenbuch der Mathematik, Verlag Harri Deutsch, 1993
- [25] D.W.R Paulus, J.Hornegger, Applied Pattern Recognition, Vieweg Verlag, 2003
- [26] AMASE/Kjell-Ove Storvik
- [27] NASA, JPL
- [28] A.Erhard: Einführung in die digitale Bildverarbeitung, Springer Verlag 2008

A Anhang

Matlab-Simulationsergebnisse Mars-Referenzbild:

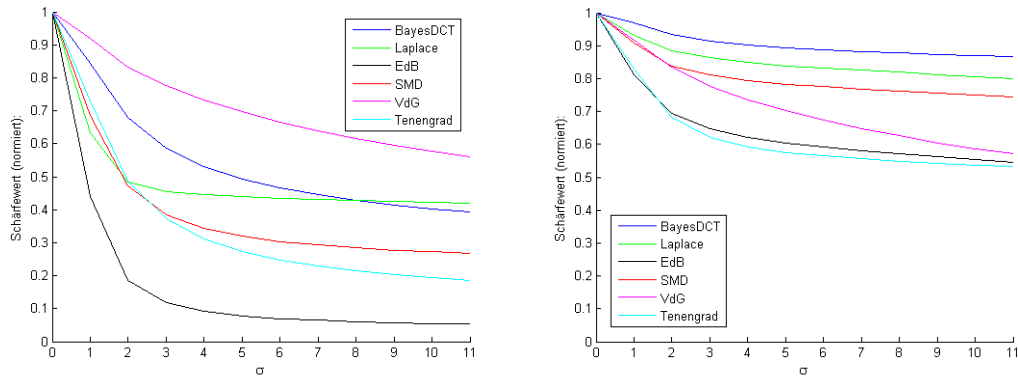


Abbildung 98: Marsreferenzbild Matlab Rauschen $r=0.01$ (links), $r=0.03$ (rechts)

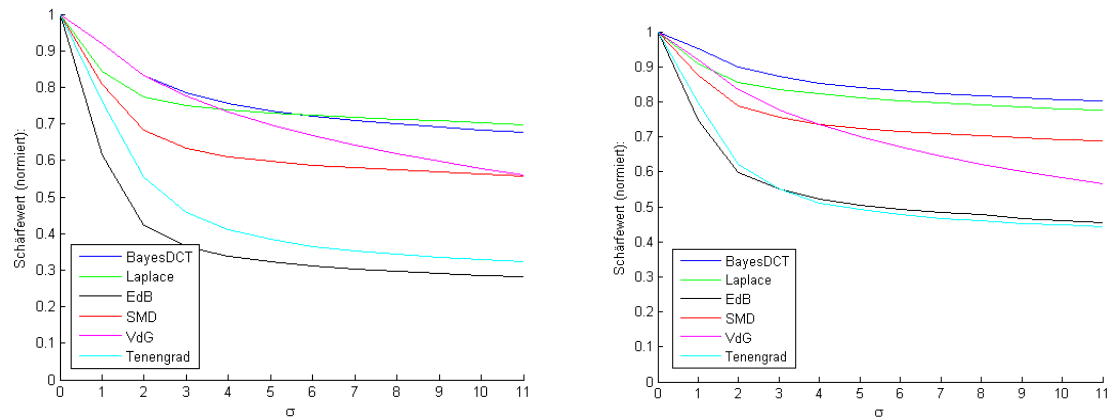


Abbildung 99: Marsreferenzbild Matlab Rauschen $r=0.05$ (links), $r=0.07$ (rechts)

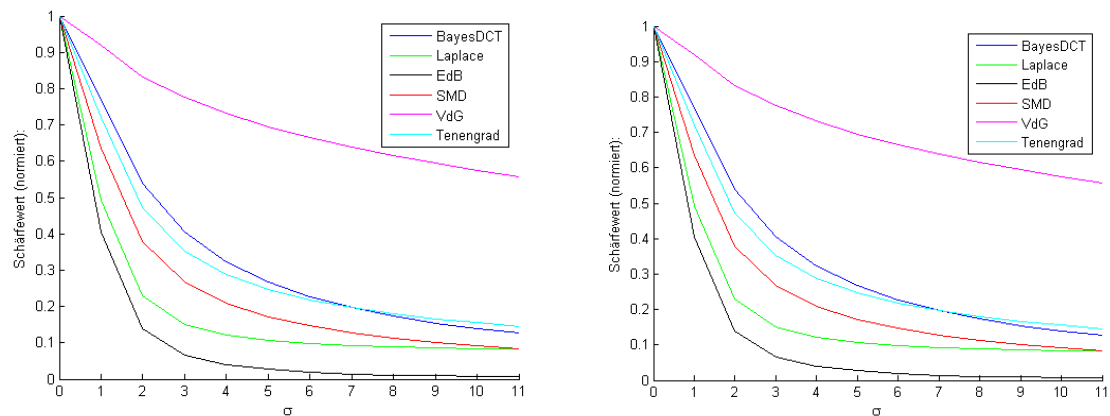


Abbildung 100: Marsreferenzbild Matlab Belichtung $b=0.1$ (links), $r=1.08$ (rechts)

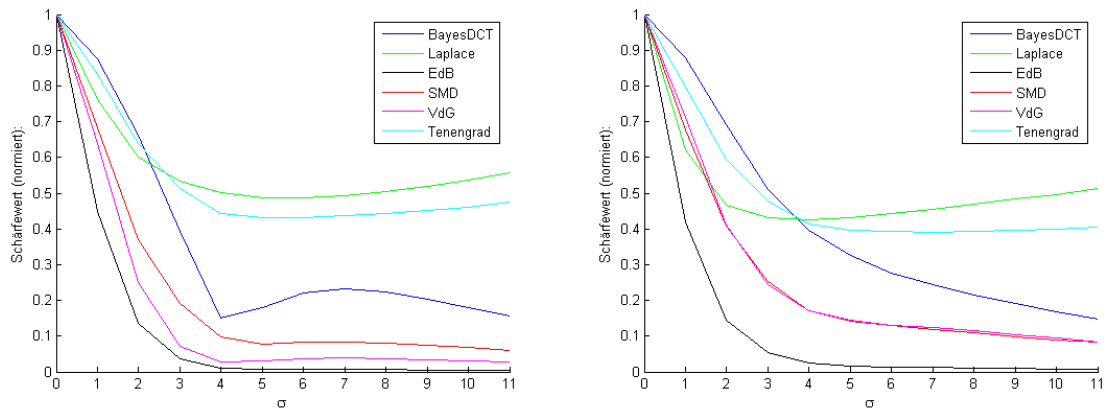


Abbildung 101: Marsreferenzbild Matlab Fenstergröße 5x5Pixel (links), 10x10Pixel (rechts)

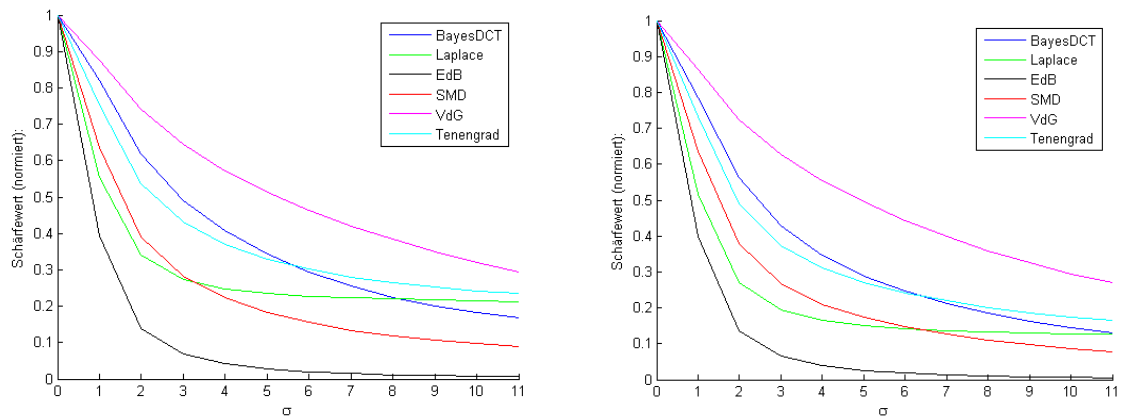


Abbildung 102: Marsreferenzbild Matlab Fenstergröße 50x50Pixel (links), 100x100Pixel (rechts)

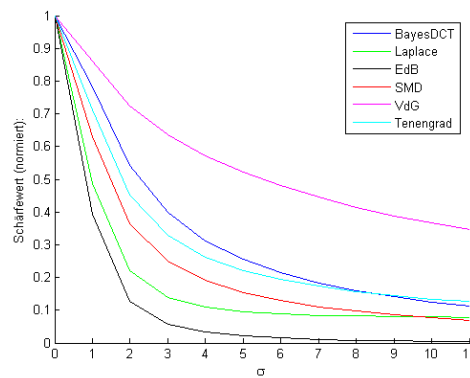


Abbildung 103: Marsreferenzbild Matlab Rauschen 200x200Pixel

Matlab-Simulationsergebnisse Stein-Referenzbild:

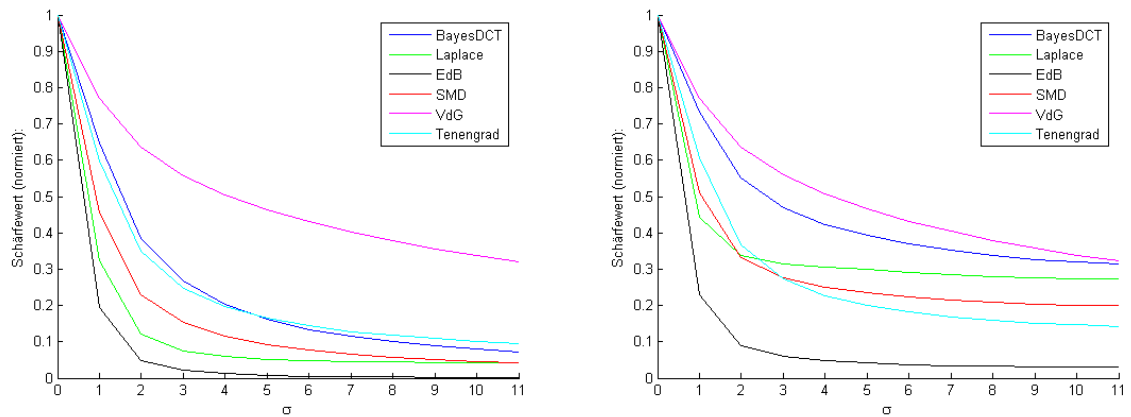


Abbildung 104: Steinreferenzbild Matlab Rauschen $r=0.01$ (links), $r=0.03$ (rechts)

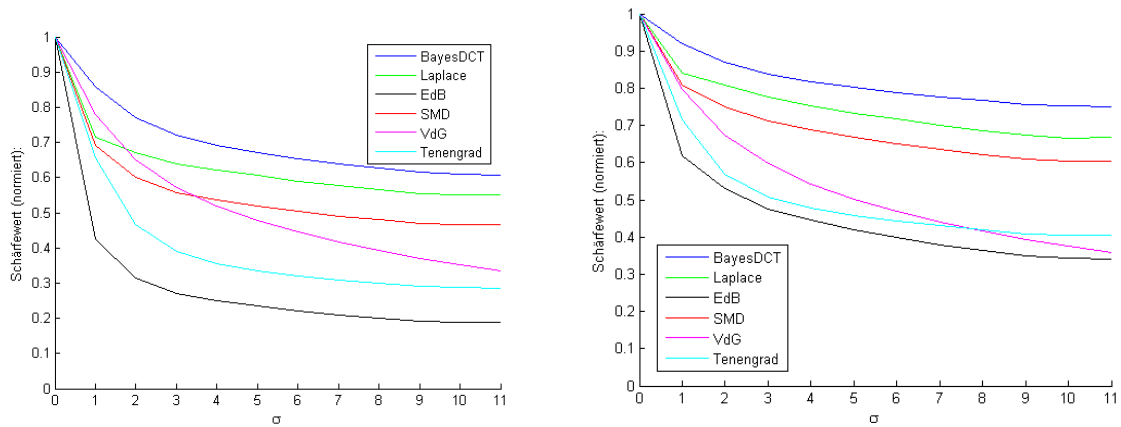


Abbildung 105: Steinreferenzbild Matlab Rauschen $r=0.05$ (links), $r=0.07$ (rechts)

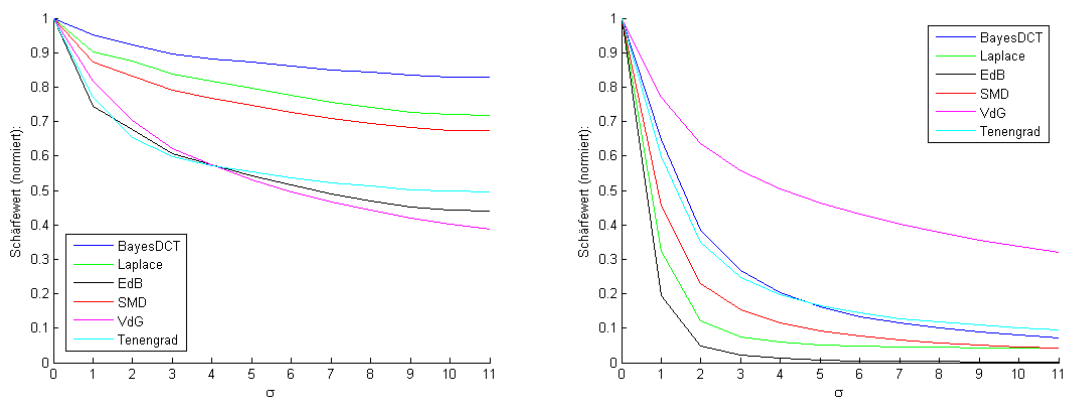


Abbildung 106: Steinreferenzbild Matlab Belichtung $b=0.1$ (links), $r=1.08$ (rechts)

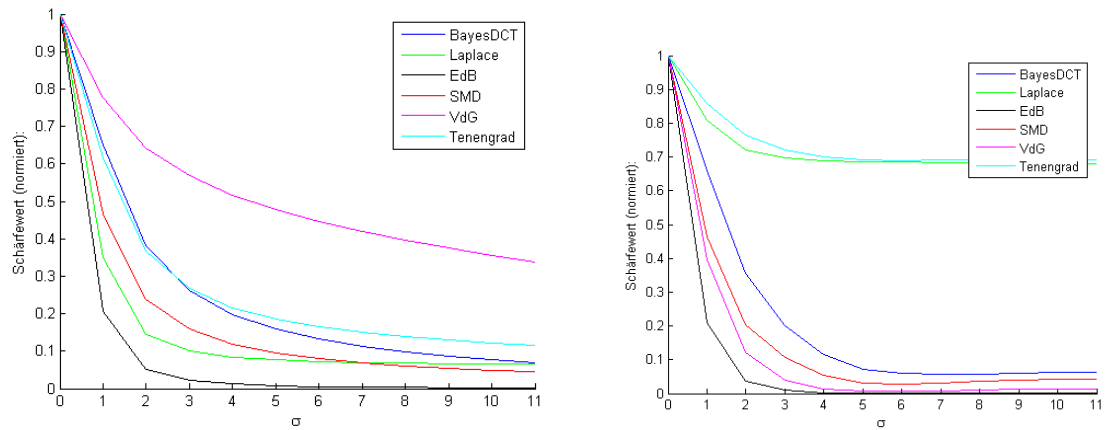


Abbildung 107: Steinreferenzbild Matlab Fenstergröße 5x5Pixel (links), 10x10Pixel (rechts)

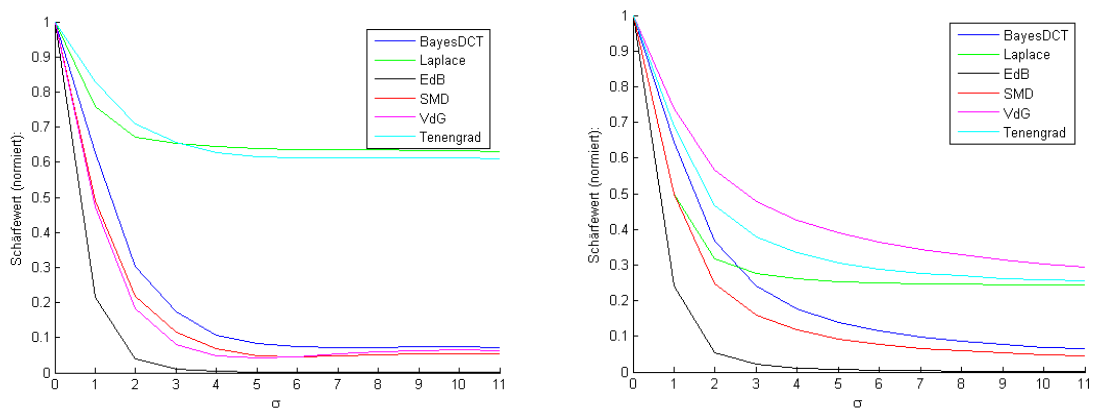


Abbildung 108: Steinreferenzbild Matlab Fenstergröße 50x50Pixel (links), 100x100Pixel (rechts)

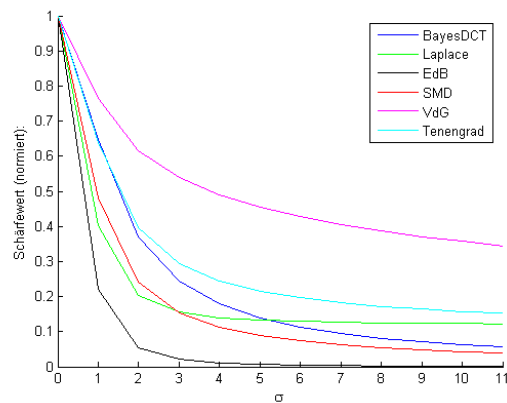


Abbildung 109: Steinreferenzbild Matlab Fenstergröße 200x200Pixel